продлён до 1 июля [illegible]

ОТРАСЛЕВОЙ СТАНДАРТ

Проверен в 1984г. Срок действия продлен до 01.01.

АППАРАТУРА РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ

БЛОКИ НА МИКРОСБОРКАХ, МИКРОСХЕМАХ И ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТАХ

Методы расчета тепловых режимов

ОСТ4 ГО.012.032

Редакция 2-79

Издание официальное

1980

621.396.69.017.71.001.24

УДК ~~621.396.6.017.7-1814.001.24.001.5~~ Группа 302

Экз 1

ОТРАСЛЕВОЙ СТАНДАРТ

АППАРАТУРА РАДИОЭЛЕКТРОННАЯ БЛОКИ НА МИКРОСБОРКАХ, МИКРОСХЕМАХ И ДИСКРЕТНЫХ ЭЛЕКТРОРАДИОЭЛЕМЕНТАХ Методы расчета тепловых режимов	ОСТ4 ГО.012.032 Редакция 2-79 Взамен ОСТ4 ГО.012.032 Редакция I-73

Директивным письмом организации от "21" сентября 1979 г. № 017-107/Н103 срок действия установлен с "01" января 1981 г. до "01" января 1986 г.

Настоящий стандарт распространяется на блоки и ячейки радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) по ОСТ4 ГО.010.009 на микросборках, микросхемах в корпусах по ОСТ II.073.001-75 и ГОСТ 17467-72 и дискретных электрорадиоэлементах (ЭРЭ).

Стандарт устанавливает методы расчета тепловых режимов блоков РЭА на микросборках, микросхемах и дискретных ЭРЭ с применением естественного воздушного охлаждения, принудительного воздушного охлаждения и кондуктивного охлаждения.

Применяемые в стандарте термины и определения приведены в обязательном приложении I.

I. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Стандарт позволяет производить расчеты стационарного и нестационарного тепловых режимов блоков РЭА на микросборках, микросхемах и дискретных ЭРЭ, работающих при нормальном (0,I МПа) и пониженном (до 0,I Па) давлении окружающей среды, имеющей температуру от 2I3 до 358 К.

I.2. Выбор микросборок, микросхем и дискретных ЭРЭ, температура которых подлежит расчету, производят по ОСТ4 ГО.0I2.004.

I.3. В результате расчета определяют максимальную температуру корпуса и температуру воздуха для микросборок, микросхем и дискретных ЭРЭ.

I.4. Погрешность расчета перегрева корпуса микросборок, микросхем, дискретных ЭРЭ и воздуха в блоке не превышает ±25%.

I.5. Расчет теплового режима блоков РЭА, работающих в составе стойки (шкафа), выполняют в порядке, установленном в разделах 3 и 4 настоящего стандарта и в рекомендуемом приложении 2.

I.6. Формулы для аппроксимации графического материала приведены в рекомендуемом приложении 3.

I.7. Программы расчета тепловых режимов блоков РЭА на ЭВМ приведены в рекомендуемом приложении 4.

I.8. Примеры расчета тепловых режимов блоков РЭА приведены в рекомендуемом приложении 5.

I.9. Свойства материалов и соотношение между единицами давления приведены в справочном приложении 6.

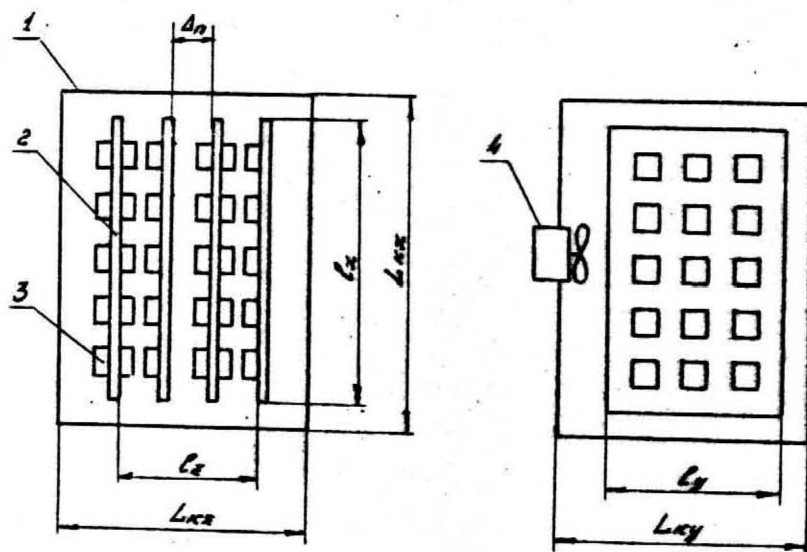
I.I0. Таблицы модифицированных функций Бесселя второго рода нулевого и первого порядка $K_0(mr)$ и $K_1(mr)$ приведены в справочном приложении 7.

I.II. Схематическое изображение блока РЭА с естественным воздушным охлаждением и внутренним перемешиванием воздуха показано на черт.I.

I.I2. Схематическое изображение блока РЭА с принудительным воздушным охлаждением показано на черт.2.

I.I3. Схематическое изображение ячейки с теплопроводными шинами показано на черт.3.

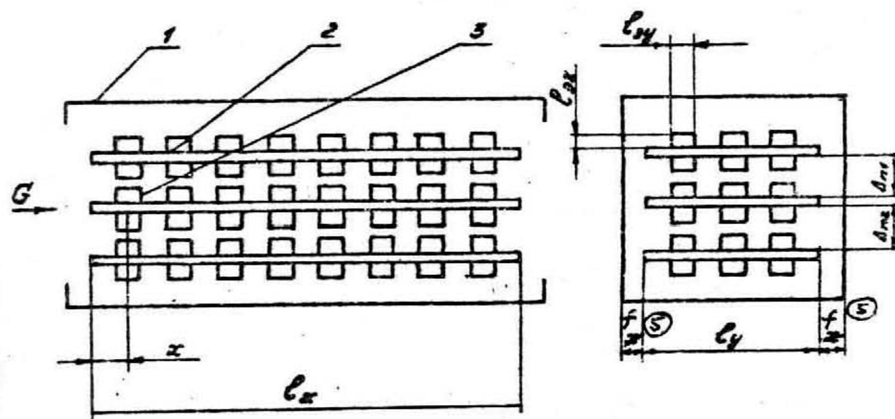
Схематическое изображение блока РЭА с естественным воздушным охлаждением и внутренним перемешиванием воздуха



I – корпус блока; 2 – ячейка; 3 – микросборка, микросхема, дискретный ЭРЭ; 4 – вентилятор

Черт.I

Схематическое изображение блока РЭА с принудительным воздушным охлаждением

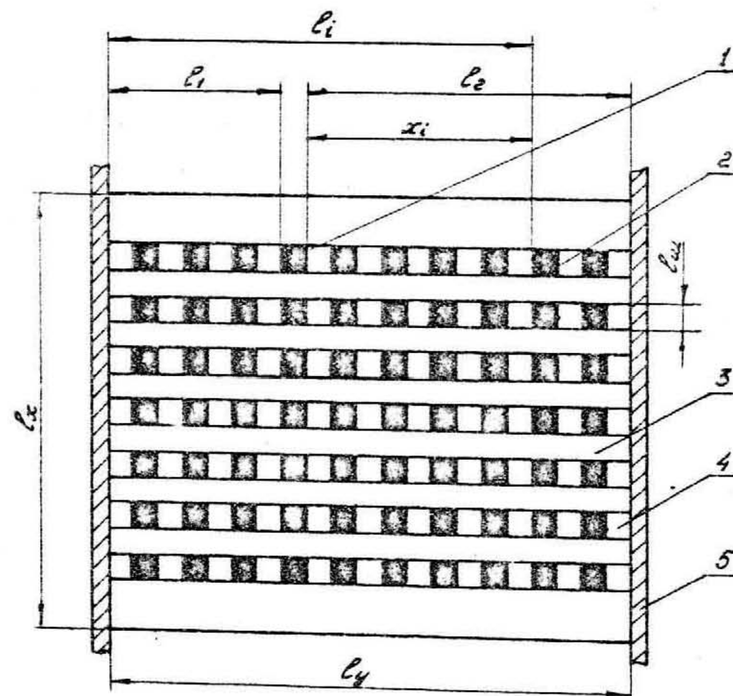


I – корпус блока; 2 – ячейка; 3 – микросборка, микросхема, дискретный ЭРЭ.

Черт.2

Схематическое изображение

ячейки с теплопроводными шинами



I – рассчитываемая микросборка, микросхема; 2 – микросборка, микросхема, окружающая рассчитываемую и установленная с ней на одной теплопроводной шине; 3 – печатная плата; 4 – теплопроводная шина; 5 – корпус блока

Черт.3

2. ОЦЕНКА ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА ЯЧЕЕК И БЛОКОВ РЭА. ВЫБОР СПОСОБА ОХЛАЖДЕНИЯ

2.I. Оценку теплового режима ячеек и блоков РЭА осуществляют по ОСТ4 ГО.012.004.

2.2. Выбор способа охлаждения и оценку расхода воздуха осуществляют по ОСТ4 ГО.070.003.

3. РАСЧЕТ СТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

3.I. Расчет теплового режима микросборок (микросхем) в блоке при естественном воздушном охлаждении и внутреннем перемешивании воздуха.

3.I.I. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

базовая температура t_o, К;

мощность, выделяющаяся в блоке, $Q_б$, Вт;

мощности, выделяющиеся в микросборках (микросхемах), $Q_э$, Вт;

производительность вентилятора (при внутреннем перемешивании воздуха) $G_в$, кг/с ;

размеры корпуса блока без учета теплоотдающих ребер $L_{кx}$, $L_{кy}$, $L_{кz}$; м (см.черт.I);

коэффициент заполнения блока $K_з$;

общая площадь внешней поверхности корпуса блока $S_к$, м^2 ;

суммарная площадь поверхности микросборки (микросхемы) и радиатора $S_э$, м^2;

площадь основания микросборки (микросхемы) $S_{эо}$, м^2;

размеры печатных плат ячейки ℓ_x, ℓ_y, м (см.черт.I);

расстояние между крайними ячейками в блоке ℓ_z, м (см.черт.I);

коэффициент перфорации корпуса блока $K_п$;

суммарная толщина печатной платы и теплопроводных шин ячейки $\delta_п$, м;

зазор между основанием микросборки (микросхемы) и печатной платой (теплопроводной шиной) $\delta_з$, м;

коэффициент теплопроводности диэлектрического основания печатной платы λ_1, Вт/(м·К);

коэффициент теплопроводности материала теплопроводной шины печатной платы λ_2, Вт/(м·К);

коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между микросборкой (микросхемой) и печатной платой (теплопроводной шиной), $\lambda_з$, Вт/(м·К);

объем печатной платы с учетом объема теплопроводных шин $V_п$, м^3;

объем теплопроводных шин на печатной плате $V_ш$, м^3;

суммарная площадь, занимаемая теплопроводными шинами на печатной плате, $S_ш$, м^2;

расстояние между центром рассчитываемой микросборки (микросхемы) и центрами остальных микросборок (микросхем) на печатной

плате r_i, м;

шаг установки микросборок (микросхем) в ячейке t_x, t_y, м;

расстояние между печатными платами соседних ячеек $\Delta_п$, м (см.черт.I);

ширина теплопроводной шины $\ell_ш$, м (см.черт.3);

площадь поперечного сечения теплопроводной шины $f_ш$, м^2;

длины теплопроводной шины от корпуса блока до корпуса микросборки (микросхемы) ℓ_1, ℓ_2, м (см.черт.3);

число микросборок (микросхем), установленных на одной теплопроводной шине с рассчитываемой, $N_ш$;

расстояние от рассчитываемой микросборки (микросхемы) до остальных микросборок (микросхем), установленных на одной теплопроводной шине с рассчитываемой, x_i, м (см.черт.3);

давление окружающей среды H_1, Па;

давление воздуха внутри корпуса блока H_2, Па;

половина площади кондуктивного теплообмена теплопроводной шины с корпусом блока F, м^2;

усилие прижатия ячейки к корпусу блока P, Па;

длина отрезка теплопроводной шины от корпуса блоке до микросборки (микросхемы) с индексом i, на котором расположена рассчитываемая микросборка (микросхема), ℓ_i, м (см.черт.3).

Расчет выполняют в порядке, установленном в последующих пунктах.

3.I.2. Определяют удельную мощность корпуса блока $q_к$

$$q_к = \frac{Q_б}{S_к} . \qquad (I)$$

Примечание. При работе блока в составе стойки (шкафа) в качестве $Q_б$ принимают результирующую мощность блока $Q_{бр}$, определяемую в соответствии с рекомендуемым приложением 2.

3.1.3. Определяют перегрев корпуса блока $\vartheta_к$

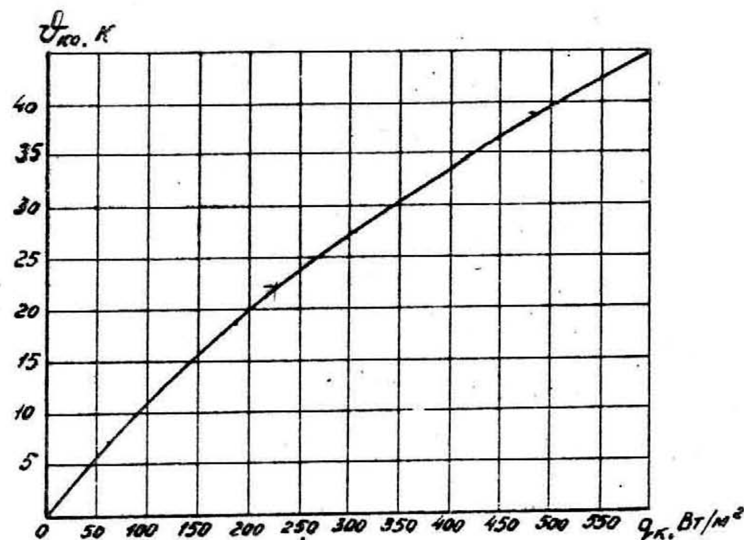
$$\vartheta_к = \vartheta_{ко} \cdot K_{кп} \cdot K_н, \qquad (2)$$

где $\vartheta_{ко}$ – перегрев корпуса герметичного блока, К, при давлении окружающей среды 0,1 МПа (определяют по графику, приведенному на черт.4);

$K_{кп}$ – коэффициент, учитывающий перфорацию корпуса блока (определяют по графику, приведенному на черт.5);

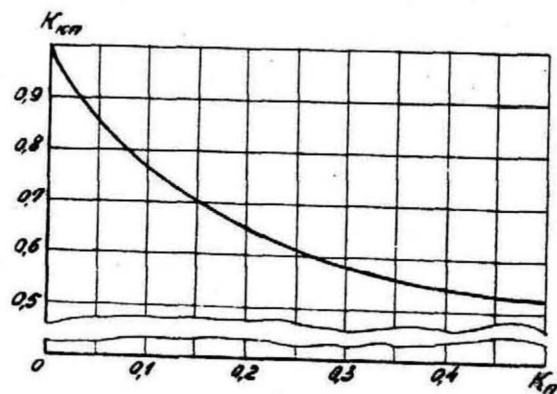
$K_н$ – коэффициент, учитывающий давление окружающей среды (определяют по графику, приведенному на черт.6).

Зависимость перегрева корпуса герметичного блока при давлении окружающей среды 0,1 МПа от удельной мощности корпуса блока



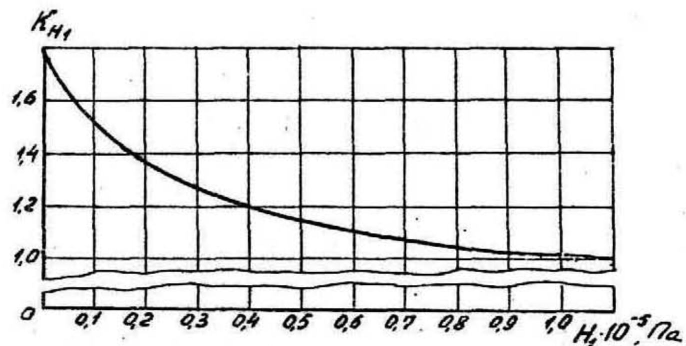
Черт.4

Зависимость коэффициента $K_{кп}$
от коэффициента перфорации корпуса блока



Черт.5.

Зависимость коэффициента K_{H_1}
от давления окружающей среды



Черт.6.

3.1.4. Определяют удельную мощность нагретой зоны блока $q_з$

$$q_з = \frac{Q_з}{2\left[L_{кx} L_{кy} + \left(\frac{1}{L_{кx}} + \frac{1}{L_{кy}}\right) \ell_x \ell_y \ell_z\right]} . \qquad (3)$$

3.1.5. Определяют среднеобъемный перегрев нагретой зоны блока $\vartheta_з$

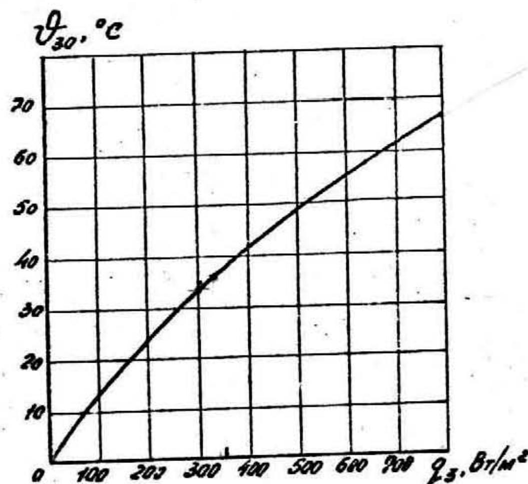
$$\vartheta_з = \vartheta_к + (\vartheta_{з0} - \vartheta_{к0}) K_{кп} \cdot K_w \cdot K_{H_2} , \qquad (4)$$

где $\vartheta_{з0}$ – среднеобъемный перегрев нагретой зоны блока в герметичном корпусе при давлении воздуха внутри блока 0,1 МПа и отсутствии внутреннего перемешивания воздуха, К(определяют по графику, приведенному на черт.7);

K_w – коэффициент, учитывающий внутреннее перемешивание воздуха (определяют по графику, приведенному на черт.8);

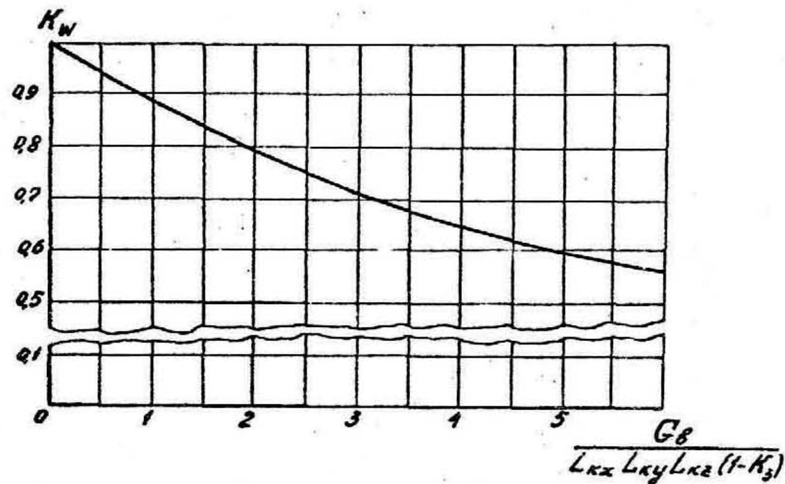
K_{H_2} – коэффициент, учитывающий давление воздуха внутри блока (определяют по графику, приведенному на черт.9).

Зависимость среднеобъемного перегрева нагретой зоны блока в герметичном корпусе при давлении воздуха внутри блока 0,1 МПа и отсутствии внутреннего перемешивания воздуха от удельной мощности нагретой зоны блока



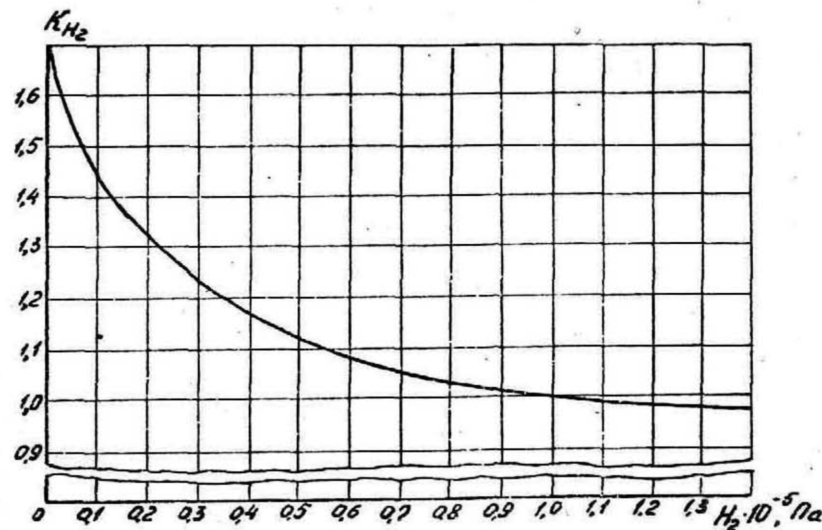
Черт.7

Зависимость коэффициента K_w от кратности обмена воздуха в блоке $\frac{G_в}{L_{кx} L_{кy} L_{кz} (1-K_з)}$



Черт.8

Зависимость коэффициента K_{H_2} от давления воздуха внутри блока



Черт.9

3.I.6. Определяют среднеобъемный перегрев воздуха внутри блока $\vartheta_в$

$$\vartheta_в = \frac{\vartheta_з + \vartheta_к}{2}. \qquad (5)$$

3.I.7. Определяют тепловую проводимость от микросборки (микросхемы) к корпусу блока через воздух внутри блока $\sigma_к$

$$\sigma_к = \frac{\left(4,5\sqrt{\frac{H_з}{10^5}}+4\right)\left(2\ell_y+\ell_x\right)\Delta_п \cdot K_\alpha\left(S_з - S_{зо}\right)}{\left(4,5\sqrt{\frac{H_з}{10^5}}+4\right)\left(2\ell_y+\ell_x\right)\Delta_п + K_\alpha\left(S_з - S_{зо}\right)}, \qquad (6)$$

где K_α – коэффициент, учитывающий теплоотдачу от корпусов микросборок (микросхем), Вт/(м^2·К) (определяют по графику, приведенному на черт.I0).

3.I.8. Определяют тепловую проводимость от микросборки (микросхемы) к корпусу блока по теплопроводной шине $\sigma_ш$

$$\sigma_ш = \frac{\sigma_{ст} F \cdot \lambda_2 \cdot f_ш}{\lambda_2 \cdot f_ш + \sigma_{ст} F \cdot \ell_1} + \frac{\lambda_2 \cdot f_ш \cdot \sigma_{ст} \cdot F}{\lambda_2 f_ш + \sigma_{ст} \cdot F \cdot \ell_2}, \qquad (7)$$

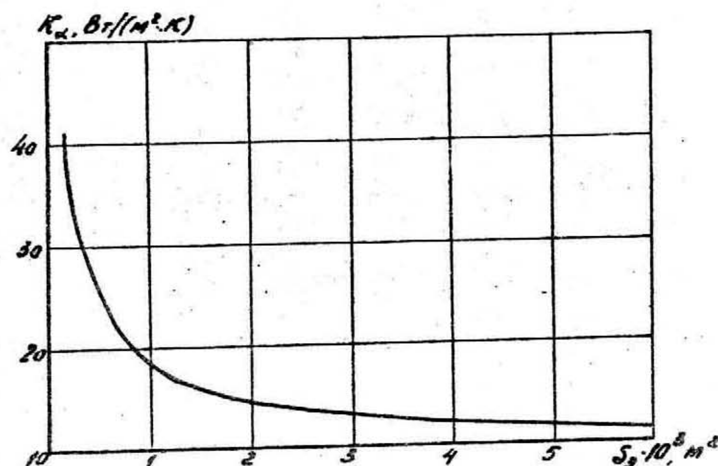
где $\sigma_{ст}$ – удельная тепловая проводимость контакта теплопроводной шины с корпусом блока, Вт/(м^2·К):

при отсутствии прижима ячеек к корпусу блока рекомендуется принимать $\sigma_{ст}$ = 270 Вт/(м^2·К);

при наличии прижима ячеек к корпусу блока $\sigma_{ст}$ рекомендуется определять по графику, приведенному на черт.II.

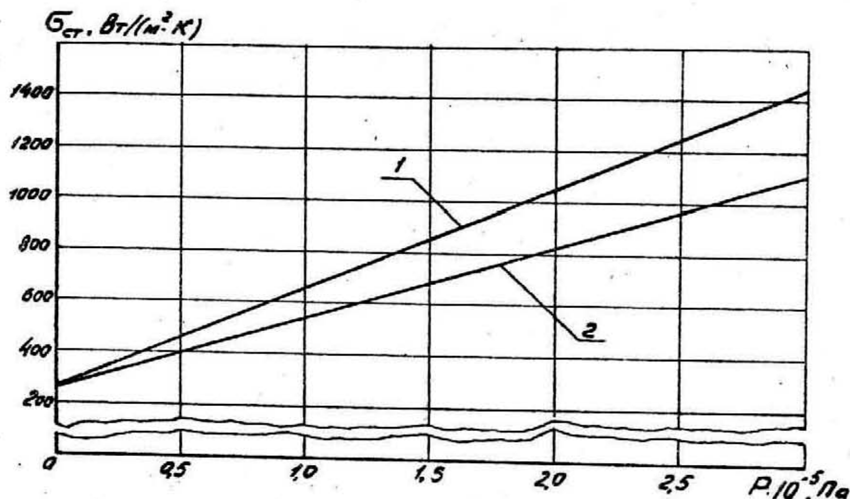
Примечание. При отсутствии теплопроводных шин в ячейке $\sigma_ш = 0$.

Зависимость коэффициента K_α от площади поверхности корпуса микросборки (микросхемы)



Черт.I0

Зависимость удельной тепловой проводимости контакта теплопроводной шины с корпусом блока от усилия прижатия ячейки к корпусу блока



I – контакт медной теплопроводной шины с алюминиевым корпусом блока; 2 – контакт алюминиевой теплопроводной шины с алюминиевым корпусом блока

Черт.II

3.I.9. Определяют отношение тепловых проводимостей $\mathcal{D}$

$$\mathcal{D} = \frac{\sigma_{к}}{\sigma_{ш}}. \qquad (8)$$

3.I.I0. Если $\mathcal{D} > 0,25$, дальнейший расчет выполняют в порядке, установленном в пп.3.I.I3–3.I.22.

3.I.II. Если $\mathcal{D} \leq 0,25$, дальнейший расчет выполняют в порядке, установленном в пп.3.I.23–3.I.26.

3.I.I2. Если $\mathcal{D} = \infty$, дальнейший расчет выполняют в порядке, установленном в пп.3.I.I4–3.I.22, принимая в качестве $\lambda_{экв}$ коэффициент теплопроводности диэлектрического основания печатной платы λ_1.

3.I.I3. Определяют эквивалентный коэффициент теплопроводности ячейки $\lambda_{экв}$

$$\lambda_{экв} = (1-A)\frac{2\lambda_1}{1-\frac{V_ш}{V_п}} + A\frac{\lambda_2}{2}\cdot\frac{V_ш}{V_п}, \qquad (9)$$

где A – коэффициент, учитывающий установку теплопроводных шин в ячейке:

при установке теплопроводных шин с одной стороны печатной платы

$$A = \frac{S_ш}{l_x l_y}; \qquad (10)$$

при установке теплопроводных шин с двух сторон печатной платы

$$A = \frac{S_ш}{2 l_x l_y}. \qquad (11)$$

Примечание. При отсутствии теплопроводных шин $\lambda_{экв} = \lambda_1$.

3.1.14. Определяют эквивалентный радиус микросборки (микросхемы) R

$$R = \sqrt{\frac{S_{эо}}{\pi}} . \qquad (12)$$

3.1.15. Определяют параметр m

$$m = \sqrt{\frac{2\left(\alpha_к\sqrt{\frac{H_2}{10^5}} + \alpha_л\right)}{\delta_п \cdot \lambda_{экв}}}, \qquad (13)$$

где $\alpha_к$ – конвективный коэффициент теплоотдачи с поверхности ячейки, Вт/(м^2·К);

$\alpha_л$ – лучистый коэффициент теплоотдачи с поверхности ячейки, Вт/(м^2·К).

Примечание. При выполнении расчетов рекомендуется принимать $\alpha_к$ = 4,5 Вт/(м^2·К), $\alpha_л$ = 4,0 Вт/(м^2·К).

3.1.16. Определяют собственный перегрев корпуса микросборки (микросхемы) $\vartheta_{эс}$

$$\vartheta_{эс} = K\left[\frac{Q_э}{\left[(K_к - 4)\sqrt{\frac{H_2}{10^5}} + 4\right](S_э - S_{эо}) + \cfrac{1}{\cfrac{\delta_з}{\lambda_з \pi R^2} + \cfrac{1}{B + M\pi R\lambda_{экв}\delta_п m K_1(mR)/K_0(mR)}}}\right], \qquad (14)$$

где K – эмпирический коэффициент. Рекомендуется принимать K=1,14 для микросборок (микросхем), центр которых отстоит от торцов печатной платы на расстоянии меньше $3R$, и K=1 для микросборок (микросхем), центр которых отстоит от торцов печатной платы на расстоянии больше $3R$;

B – обозначение, введенное для упрощения формы записи:

при одностороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке

$$B = \left(4{,}5\sqrt{\frac{H_2}{10^5}} + 4\right)\pi R^2;$$

при двустороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке

$$B = 0;$$

M – обозначение, введенное для упрощения формы записи:

при одностороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке

$$M = 2;$$

при двустороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке

$$M = 1;$$

$K_0(mR), K_1(mR)$ – модифицированные функции Бесселя второго рода нулевого и первого порядка (определяют по таблице справочного приложения 7).

3.I.I7. Определяют предельный радиус взаимного теплового влияния для микросборки (микросхемы) $r_{пр}$

$$r_{пр} = \frac{1}{m\left[0{,}105\,\dfrac{K_0(mR)+4K_0(2{,}7\,mR)}{\dfrac{1}{t_x}+\dfrac{1}{t_y}}\,m+0{,}155\right]}. \tag{I5}$$

3.I.I8. Определяют наведенный перегрев для микросборки (микросхемы) $\vartheta_{эф}$

$$\vartheta_{эф}=\sum_{i=1}^{N}\frac{Q_{эi}}{\left[(K_{\alpha i}-4)\sqrt{\dfrac{H_2}{10^5}}+4\right](S_{эi}-S_{эоi})\left\{1+\left[\dfrac{\delta_{эi}}{\lambda_{эз}\pi R_i^2}+\dfrac{(S_{эi}-S_{эоi})^{-1}}{\left[(K_{\alpha i}-4)\sqrt{\dfrac{H_2}{10^5}}+4\right]}\right]\left[B_i+M\pi R_i\lambda_{экв}\delta_n m\dfrac{K_1(mR_i)}{K_0(mR_i)}\right]\right\}}\cdot\frac{K_0(mr_i)}{K_0(mR_i)}, \tag{I6}$$

где i – индекс, относящийся к микросборкам (микросхемам), установленным на одной печатной плате с рассчитываемой, для которых $r_i \le r_{пр}$;

B_i – обозначение, введенное для упрощения формы записи:

при одностороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке

$$B_i=\left(4{,}5\sqrt{\frac{H_2}{10^5}}+4\right)\pi R_i^2;$$

при двустороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке

$$B_i=0.$$

3.I.I9. Определяют перегрев корпуса микросборки (микросхемы) относительно базовой температуры $\vartheta_э$

$$\vartheta_э=\vartheta_в+\vartheta_{эс}+\vartheta_{эф}. \tag{I7}$$

3.I.20. Определяют температуру корпуса микросборки (микросхемы) $t_э$

$$t_э=t_0+\vartheta_э. \tag{I8}$$

3.I.2I. Определяют перегрев воздуха для микросборки (микросхемы) относительно базовой температуры $\vartheta_{вэ}$

$$\vartheta_{вэ}=\vartheta_э-\vartheta_{эс}. \tag{I9}$$

3.I.22. Определяют температуру воздуха для микросборки (микросхемы) $t_{вэ}$

$$t_{вэ}=t_0+\vartheta_{вэ}. \tag{20}$$

3.I.23. Определяют собственный перегрев корпуса микросборки (микросхемы) $\vartheta_{эс}$

$$\vartheta_{эс}=\frac{Q_э}{\sigma_к+\sigma_ш}. \tag{2I}$$

3.I.24. Определяют наведенный перегрев для микросборки (микросхемы) $\vartheta_{эф}$

$$\vartheta_{эф}=\sum_{i=1}^{N_ш}\frac{Q_{эi}}{\sigma_{кi}+\sigma_{шi}}\cdot\frac{\left(1+\dfrac{\sigma_{ст}l_i}{\lambda_z}\right)-\dfrac{\sigma_{ст}x_i}{\lambda_z}}{\left(1+\dfrac{\sigma_{ст}l_i}{\lambda_z}\right)}, \tag{22}$$

где i – индекс, относящийся к микросборкам (микросхемам), установленным на одной теплопроводной шине с рассчитываемой.

3.I.25. Определяют перегрев корпуса микросборки (микросхемы) относительно базовой температуры $\vartheta_э$

$$\vartheta_э = \vartheta_к + \vartheta_{эс} + \vartheta_{эф}. \qquad (23)$$

3.I.26. Определяют температуру корпуса микросборки (микросхемы) $t_э$

$$t_э = t_о + \vartheta_э. \qquad (24)$$

3.2. Расчет теплового режима дискретных ЭРЭ в блоке с естественным воздушным охлаждением и внутренним перемешиванием воздуха

3.2.I. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

базовая температура $t_о$, К;

мощность, выделяющаяся в блоке, $Q_б$, Вт;

мощность, выделяющаяся в дискретном ЭРЭ, $Q_э$, Вт;

производительность вентилятора (при внутреннем перемешивании воздуха) $G_в$, кг/с;

размеры корпуса блока без учета теплоотдающих ребер $L_{кx}, L_{ку}, L_{кz}$, м (см.черт.I);

коэффициент заполнения блока $K_з$;

общая площадь внешней поверхности корпуса блока $S_к$, м^2;

суммарная площадь поверхности дискретного ЭРЭ и радиатора $S_э$, м^2;

размеры печатных плат ячейки ℓ_x, ℓ_y, м (см.черт.I);

коэффициент перфорации корпуса блока $K_п$;

давление окружающей среды H_1, Па;

давление воздуха внутри корпуса блока H_2, Па.

Расчет выполняют в порядке, установленном в последующих пунктах.

3.2.2. Определяют среднеобъемный перегрев нагретой зоны блока $\vartheta_з$ и среднеобъемный перегрев воздуха в блоке $\vartheta_в$ в порядке, установленном в пп.3.I.2-3.I.6.

3.2.3. Определяют удельную мощность дискретного ЭРЭ $q_э$

$$q_э = \frac{Q_э}{S_э}. \qquad (25)$$

3.2.4. Определяют лучистый коэффициент теплоотдачи для дискретного ЭРЭ $\alpha_л$

$$\alpha_л = \varepsilon \cdot 0{,}227 \left[\frac{0{,}5(0{,}04 q_э + \vartheta_в + t_о + \vartheta_з + t_о)}{100}\right]^3, \qquad (26)$$

где ε – степень черноты поверхности корпуса дискретного ЭРЭ (определяют по табл.I справочного приложения 6).

3.2.5. Определяют конвективный коэффициент теплоотдачи для дискретного ЭРЭ $\alpha_к$:

при $0{,}04 q_э \leq \left(\frac{840}{M_э \cdot 10^3}\right)^3$

$$\alpha_к = 1{,}32 \sqrt[4]{\frac{0{,}04 q_э}{M_э}} \sqrt{\frac{H_2}{10^5}}, \qquad (27)$$

где $M_э$ - определяющий размер дискретного ЭРЭ;

при $0{,}04 q_э > \left(\frac{840}{M_э \cdot 10^3}\right)^3$

$$\alpha_к = 0{,}062 q_э \sqrt{\frac{H_г}{10^3}} . \quad (28)$$

Примечания:
1. Для дискретных ЭРЭ, имеющих форму шара, в качестве определяющего размера рекомендуется принимать диаметр дискретного ЭРЭ.
2. Для дискретных ЭРЭ, имеющих форму горизонтально ориентированных цилиндров, в качестве определяющего размера рекомендуется принимать максимальный диаметр дискретного ЭРЭ.
3. Для дискретных ЭРЭ, имеющих форму параллелепипеда и вертикально ориентированных цилиндров, в качестве определяющего размера рекомендуется принимать вертикальный размер.

3.2.6. Определяют перегрев корпуса дискретного ЭРЭ $\vartheta_э$

$$\vartheta_э = \begin{cases} \vartheta_в + \dfrac{Q_э}{(\alpha_л + \alpha_к) S_э}, \text{ при } & 0{,}04 q_э > \vartheta_з - \vartheta_в; \\ \vartheta_в + \dfrac{Q_э + \alpha_л(\vartheta_з - \vartheta_в - 0{,}04 q_э) S_э}{\alpha_к \cdot S_э}, \text{ при } & 0{,}04 q_э < \vartheta_з - \vartheta_в. \end{cases} \quad (29)$$

Примечание. Если $Q_э = 0$, рекомендуется принимать $\vartheta_э$ равным перегреву воздуха около ближайшего нижерасположенного тепловыделяющего дискретного ЭРЭ или микросборки (микросхемы).

3.2.7. Определяют температуру корпуса дискретного ЭРЭ $t_э$

$$t_э = t_о + \vartheta_э. \quad (30)$$

3.2.8. Определяют перегрев воздуха для дискретного ЭРЭ $\vartheta_{вэ}$

$$\vartheta_{вэ} = 0{,}67 \vartheta_{вк}. \text{(5)} \quad (31)$$

3.2.9. Определяют температуру воздуха для дискретного ЭРЭ $t_{вэ}$

$$t_{вэ} = t_о + \vartheta_{вэ}. \quad (32)$$

3.3. Расчет теплового режима микросборок (микросхем) в блоке при принудительном воздушном охлаждении

3.3.1. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

базовая температура $t_о$, К;

мощность, выделяющаяся в блоке, $Q_б$, Вт;

мощность, потребляемая вентилятором, $Q_в$, Вт;

мощность, выделяющаяся в микросборках (микросхемах) и дискретных ЭРЭ, $Q_э$, Вт;

расход охлаждающего воздуха G, кг/с;

размер печатной платы, перпендикулярный направлению движения воздуха, $\ell_у$, м (см.черт.2);

зазор между печатными платами $\Delta_п$, м (см.черт.2);

размеры микросборки (микросхемы) $\ell_{эу}, \ell_{эz}$, м (см.черт.2);

расстояние от торца печатной платы до центра рассчитываемой микросборки (микросхемы) в направлении движения воздуха x, м (см.черт.2);

количество печатных плат в блоке $N_п$;

количество микросборок (микросхем) в сечении воздушного зазора между ячейками на расстоянии x, n_x;

суммарная толщина печатной платы и теплопроводных шин $\delta_п$, м;

зазор между основанием микросборки (микросхемы) и печатной платой (теплопроводной шиной) δ_3 ,м;

коэффициент теплопроводности диэлектрического основания печатной платы λ_1 , Вт/(м·К);

коэффициент теплопроводности материала теплопроводной шины печатной платы λ_2 ,Вт/(м·К);

коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между микросборкой (микросхемой) и печатной платой (теплопроводной шиной), λ_3 , Вт/(м·К);

объем печатной платы с учетом объема теплопроводных шин $V_п$, м^3;

объем теплопроводных шин на печатной плате $V_ш$, м^3;

суммарная площадь, занимаемая теплопроводными шинами на печатной плате, $S_ш$, м^2;

расстояние между центром рассчитываемой микросборки (микросхемы) и центрами остальных микросборок (микросхем) на печатной плате r_i , м;

суммарная площадь поверхности микросборки (микросхемы) и радиатора $S_э$, м^2;

площадь основания микросборки (микросхемы) $S_{эо}$, м^2;

шаг установки микросборок (микросхем) в ячейке t_x, t_y ,м;

зазор между ячейками и корпусом блока χ ,м (см.черт.2).

Расчет выполняют в порядке, установленном в последующих пунктах.

3.3.2. Определяют площадь свободного сечения воздушного

зазора между ячейками $f_{лс}$ на расстоянии x

$$f_{лс} = (\ell_y + 2\chi)\Delta_п - \sum_{i=1}^{n_п} \ell_{эy_i} \ell_{эz_i} . \tag{33}$$

3.3.3. Определяют эквивалентный диаметр воздушного зазора между ячейками $d_{экв}$

$$d_{экв} = \frac{2 f_{лс}}{\ell_y + \Delta_п + \sum_{i=1}^{n_п} \ell_{эz_i}} . \tag{34}$$

3.3.4. Определяют перегрев воздуха для рассчитываемой микросборки (микросхемы) $\vartheta^a_{вэ}$:

при приточной вентиляции

$$\vartheta^a_{вэ} = \frac{(N_п+1)(\sum_j Q_{эj} + Q_в)}{1000\, G} ; \tag{35}$$

при вытяжной вентиляции

$$\vartheta^a_{вэ} = \frac{(N_п+1) \sum_j Q_{эj}}{1000\, G} . \tag{36}$$

Примечания:

1. При суммировании $Q_{эj}$ учитывают мощность микросборок (микросхем), дискретных ЭРЭ, расположенных перед рассчитываемой микросборкой (микросхемой) по направлению воздушного потока в том же воздушном зазоре между ячейками.
2. При работе блока в составе стойки (шкафа) $\vartheta^a_{вэ}$ определяют по формулам (8) и (9) рекомендуемого приложения 2.

3.3.5. Определяют температуру воздуха для рассчитываемой микросборки (микросхемы) $t_{вэ}$

$$t_{вэ} = t_o + \vartheta^a_{вэ} . \tag{37}$$

3.3.6. Определяют значение критерия Рейнольдса Re

$$Re = \frac{G \cdot d_{экв}}{\mu \cdot f_{лс} (N_п + 1)} , \tag{38}$$

где μ – коэффициент динамической вязкости воздуха при температуре $t_{вэ}$, Па·с) (определяют по табл.2 справочного приложения 6).

3.3.7. Определяют коэффициент теплоотдачи в воздушном зазоре между ячейками, в котором установлена рассчитываемая микросборка (микросхема), α_1 :

для воздушных зазоров с микросборками (микросхемами) в прямоугольных корпусах со штыревыми выводами

при $Re \le 10^3$ $$\alpha_1 = 0{,}29 \frac{\lambda_в}{d_{экв}} Re^{0,5}, \quad (39)$$

где $\lambda_в$ – коэффициент теплопроводности воздуха при температуре $t_{вэ}$,Вт/(м·К) (определяют по табл.2 справочного приложения 6);

при $10^3 < Re \le 10^4$ $$\alpha_1 = 0{,}037 \frac{\lambda_в}{d_{экв}} Re^{0,8}; \quad (40)$$

для воздушных зазоров с микросборками (микросхемами) в цилиндрических корпусах

при $Re \le 10^3$ $$\alpha_1 = 0{,}39 \frac{\lambda_в}{d_{экв}} Re^{0,5}; \quad (4I)$$

при $10^3 < Re \le 10^4$ $$\alpha_1 = 0{,}051 \frac{\lambda_в}{d_{экв}} Re^{0,8}; \quad (42)$$

для воздушных зазоров с микросхемами (микросборками) в прямоугольных корпусах с планарными выводами

при $Re \le 2 \cdot 10^3$ $$\alpha_1 = 0{,}25 \frac{\lambda_в}{d_{экв}} Re^{0,5}; \quad (43)$$

при $2 \cdot 10^3 < Re \le 10^4$ $$\alpha_1 = 0{,}026 \frac{\lambda_в}{d_{экв}} Re^{0,8}; \quad (44)$$

для воздушных зазоров, в которых микросборки (микросхемы) и дискретные ЭРЭ отсутствуют

при $10 < Re < 10^4$ $$\alpha_1 = 1{,}4 \frac{\lambda_в}{d_{экв}} \left(Re \frac{d_{экв}}{l_x}\right)^{0,4}; \quad (45)$$

при $10^4 \le Re < 5 \cdot 10^6$ $$\alpha_1 = 0{,}021 \frac{\lambda_в}{d_{экв}} Re^{0,8}. \quad (46)$$

3.3.8. Определяют коэффициент теплостдачи α_2 в воздушном зазоре, примыкающем к обратной стороне ячейки с рассчитываемой микросборкой, по формулам (33), (34),(38)-(46) настоящего стандарта.

3.3.9. Определяют эквивалентный коэффициент теплопроводности ячейки с рассчитываемой микросборкой (микросхемой) $\lambda_{экв}$ по формуле (9) настоящего стандарта.

3.3.I0. Определяют эквивалентный радиус микросборки (микросхемы) R по формуле (I2) настоящего стандарта.

3.3.II. Определяют параметр m :

при одностороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке $$m = \sqrt{\frac{\alpha_1 + \alpha_2 + 8}{\delta_п \cdot \lambda_{экв}}}; \quad (47)$$

при двустороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке $$m = \sqrt{\frac{2(\alpha_1 + 4)}{\delta_п \cdot \lambda_{экв}}}; \quad (48)$$

3.3.12. Определяют собственный перегрев корпуса микросборки (микросхемы) $\vartheta_{эс}$

$$\vartheta_{эс} = \frac{Q_э}{(\alpha_1+4)(S_э - S_{эо}) + \cfrac{1}{\cfrac{\delta_з}{\lambda_з \pi R^2} + \cfrac{1}{B + M\pi R \lambda_{жв} \delta_п m K_1(mR)/K_0(mR)}}}, \quad (49)$$

где B – обозначение, введенное для упрощения формы записи:

при одностороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке

$$B = (\alpha_2 + 4)\pi R^2;$$

при двустороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке

$$B = 0;$$

M – обозначение, введенное для упрощения формы записи (определяют по п.3.1.16);

$K_0(mR), K_1(mR)$ – модифицированные функции Бесселя (определяют по таблице справочного приложения 7).

3.3.13. Определяют предельный радиус взаимного теплового влияния для микросборок (микросхем) $r_{пр}$ по формуле (15) настоящего стандарта.

3.3.14. Определяют наведенный перегрев для микросборки (микросхемы) $\vartheta_{эф}$

$$\vartheta_{эф} = \sum_{i=1}^{N} \frac{Q_{эi}}{(\alpha_1+4)(S_{эi} - S_{эоi})\left\{1 + \left[\frac{\delta_{зi}}{\lambda_{зi}\pi R_i^2} + \frac{(S_{эi} - S_{эоi})^{-1}}{\alpha_1 + 4}\right]\left(B_i + M\pi R_i \lambda_{жв} \delta_п m \frac{K_1(mR_i)}{K_0(mR_i)}\right)\right\}} \cdot \frac{K_0(mr_i)}{K_0(mR_i)}, \quad (50)$$

где i – индекс, относящийся к микросборкам (микросхемам), установленным на одной печатной плате с рассчитываемой, для которых $r_i \le r_{пр}$;

B_i – обозначение, введенное для упрощения формы записи:

при одностороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке

$$B_i = (\alpha_2 + 4)\pi R_i^2;$$

при двустороннем расположении микросборок (микросхем) в ячейке

$$B_i = 0.$$

3.3.15. Определяют температуру корпуса микросборки (микросхемы) $t_э$

$$t_э = t_{в0} + \vartheta_{эс} + \vartheta_{эф}. \quad (51)$$

3.4. Расчет теплового режима дискретного ЭРЭ в блоке при принудительном воздушном охлаждении

3.4.1. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

базовая температура t_0, К;

мощность, выделяющаяся в блоке, $Q_б$, Вт;

мощность, потребляемая вентилятором, $Q_в$, Вт;

мощность, выделяющаяся в микросборках (микросхемах) и дискретных ЭРЭ, $Q_э$, Вт;

расход охлаждающего воздуха G, кг/с;

количество печатных плат в блоке $N_п$;

размеры микросборки (микросхемы), дискретного ЭРЭ $\ell_{эy}$, $\ell_{эz}$, м(см.черт.2);

расстояние от торца печатной платы до центра рассчитываемого дискретного ЭРЭ в направлении движения воздуха x, м (см.черт.2);

количество микросборок (микросхем) и дискретных ЭРЭ в сечении воздушного зазора между ячейками на расстоянии x, n_x;

половина максимального периметра дискретного ЭРЭ по направлению движения воздуха ℓ', м;

размер печатной платы, перпендикулярный направлению движения воздуха, ℓ_y, м (см.черт.2);

зазор между печатными платами Δ_n, м (см.черт.2);

зазор между ячейками и корпусом блока δ, м (см.черт.2).

Расчет выполняют в порядке, установленном в последующих пунктах.

3.4.2. Определяют площадь свободного сечения воздушного зазора между ячейками f_{xc} на расстоянии x по формуле (33) настоящего стандарта.

3.4.3. Определяют критерий Рейнольдса для дискретного ЭРЭ $Re_э$

$$Re_э = \frac{G\ell'}{\mu f_{xc}(N_n+1)}, \qquad (52)$$

где μ - коэффициент динамической вязкости воздуха (определяют по табл.2 справочного приложения 6).

3.4.4. Определяют коэффициент теплоотдачи для дискретного ЭРЭ $\alpha_э$

$$\alpha_э = 0{,}8\frac{\lambda_в}{\ell'}\sqrt{Re_э}, \qquad (53)$$

где $\lambda_в$ - коэффициент теплопроводности воздуха (определяют по табл.2 справочного приложения 6).

3.4.5. Определяют перегрев воздуха для дискретного ЭРЭ в порядке, установленном в п.3.3.4.

3.4.6. Определяют перегрев воздуха дискретного ЭРЭ $\vartheta_э$

$$\vartheta_э = \vartheta_{вэ} + \frac{Q_э}{\alpha_э S_э}. \qquad (54)$$

3.4.7. Определяют температуру корпуса дискретного ЭРЭ $t_э$

$$t_э = t_о + \vartheta_э. \qquad (55)$$

3.4.8. Определяют средний перегрев воздуха на выходе из блока $\bar{\vartheta}_в$:

при приточной вентиляции

$$\bar{\vartheta}_в = \frac{Q_{бр} + Q_в}{1000G}, \qquad (56)$$

где $Q_{бр}$ - результирующая мощность блока, Вт;

при вытяжной вентиляции

$$\bar{\vartheta}_в = \frac{Q_{бр}}{1000G}. \qquad (57)$$

Примечания:
1. Для одиночного блока $Q_{бр} = Q_б$.
2. При работе блока в составе стойки (шкафа) $Q_{бр}$ определяют по формуле (6) рекомендуемого приложения 2.

4. РАСЧЕТ НЕСТАЦИОНАРНОГО ТЕПЛОВОГО РЕЖИМА

4.I. Общие положения

4.I.I. При расчете температуры корпуса и воздуха для микросборок (микросхем) и дискретных ЭРЭ в качестве величины, определяющей стационарный тепловой режим, ϑ_{cm} выбирается соответственно перегрев корпуса или воздуха для микросборки (микросхемы) и дискретного ЭРЭ, который определяют в порядке, установленном в разделе 3.

4.2. Определение темпа охлаждения

4.2.I. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

мощность, выделяющаяся в блоке, $Q_б$, Вт;

мощность, выделяющаяся в ячейках, $Q_{cб_i}$, Вт;

масса печатных плат, теплопроводных шин, рамок ячеек, корпуса блока, элементов крепления ячеек в блоке m_i , кг;

масса блока $M_б$, кг;

масса ячейки с рассчитываемыми микросборкой (микросхемой), дискретным ЭРЭ $M_я$, кг;

удельная теплоемкость материала корпуса блока, печатных плат, теплопроводных шин, рамок ячеек, элементов крепления ячеек в блоке C_i , Дж/(кг·К);

число микросборок (микросхем), дискретных ЭРЭ, установленных в ячейке с рассчитываемой микросборкой (микросхемой), дис-

кретным ЭРЭ, n .

4.2.2. Определяют темп охлаждения a :

для герметичных блоков

$$a = \frac{Q_б}{\sum m_i c_i \cdot \vartheta_з}, \qquad (58)$$

где $\vartheta_з$ - стационарный среднеобъемный перегрев нагретой зоны блока,К (определяют по формуле (4));

для вентилируемых блоков

$$a = \frac{Q_{cб}}{\sum m_i c_i \frac{\sum_{i=1}^{n} \vartheta_{зi}}{n}}, \qquad (59)$$

где $\vartheta_{зi}$ - стационарный перегрев микросборок (микросхем) и дискретных ЭРЭ в ячейке с рассчитываемой микросборкой (микросхемой, дискретным ЭРЭ), К (определяют в порядке, установленном в разделе 3).

Примечания:
1. В формуле (58) суммирование производят в пределах блока.
2. В формуле (59) суммирование производят в пределах ячейки с рассчитываемой микросборкой (микросхемой), дискретным ЭРЭ.

4.3. Расчет теплового режима при постоянной мощности и постоянной температуре окружающей среды

4.3.I. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

базовая температура $t_о$, К;

стационарный перегрев ϑ_{cm}, К;

общее время работы блока τ, с;

темп охлаждения a, 1/с.

4.3.2. Определяют температуру t в момент времени τ

$$t = t_o + \vartheta_{cm}\left[1 - exp\{-a\tau\}\right]. \quad (60)$$

4.4. Расчет теплового режима при постоянной мощности и температуре окружающей среды, изменяющейся по линейному закону

4.4.1. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

базовая температура t_o, К;

температура окружающей среды в момент окончания работы блока t_{oc}, К;

стационарный перегрев ϑ_{cm}, К;

общее время работы блока τ, с;

темп охлаждения a, 1/с.

Расчет выполняют в порядке, установленном в последующих пунктах.

4.4.2. Определяют скорость изменения температуры окружающей среды ω_t

$$\omega_t = \frac{t_{oc} - t_o}{\tau}. \quad (61)$$

4.4.3. Определяют температуру t в момент времени τ

$$t = t_{oc} + \left(\vartheta_{cm} + \frac{\omega_t}{a}\right)\left[1 - exp\{-a\tau\}\right]. \quad (62)$$

4.5. Расчет теплового режима при постоянной мощности и температуре окружающей среды, изменяющейся по экспоненциальному закону

4.5.1. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

базовая температура t_o, К;

температура окружающей среды в момент окончания работы блока t_{oc}, К;

стационарный перегрев ϑ_{cm}, К;

общее время работы блока τ, с;

темп охлаждения a, 1/с.

Расчет выполняют в порядке, установленном в последующих пунктах.

4.5.2. Определяют темп изменения температуры окружающей среды ξ

$$\xi = \frac{1}{\tau} \ln \frac{t_{oc}}{t_o}. \quad (63)$$

4.5.3. Определяют температуру t в момент времени τ

$$t = \vartheta_{cm}\left[1 - exp\{-a\tau\}\right] + \frac{a}{a+\xi}\left[t_{oc} + t_o \frac{\xi}{a} exp\{-a\tau\}\right]. \quad (64)$$

4.6. Расчет теплового режима при периодическом импульсном выделении мощности и постоянной температуре окружающей среды

4.6.1. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные

данные:

базовая температура t_0, К;

стационарный перегрев ϑ_{cm}, К;

длительность импульса τ_u, с;

длительность промежутка между импульсами τ_σ, с;

общее время работы блока τ, с;

темп охлаждения a, 1/с.

4.6.2. Определяют температуру t в момент времени τ

$$t = t_0 + \vartheta_{cm}\,\frac{1-\exp\{-a\tau_u\}}{1-\exp\{-a(\tau_u+\tau_\sigma)\}}\left[1-\exp\{-a\tau\}\right]. \quad (65)$$

4.7. Расчет теплового режима при периодическом импульсном выделении мощности и температуре окружающей среды, изменяющейся по линейному закону

4.7.1. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

базовая температура t_0, К;

температура окружающей среды в момент окончания работы блока t_{oc}, К;

стационарный перегрев ϑ_{cm}, К;

длительность импульса τ_u, с;

длительность промежутка между импульсами τ_σ, с;

общее время работы блока τ, с;

темп охлаждения a, 1/с.

Расчет выполняют в порядке, установленном в последующих пунктах.

4.7.2. Определяют скорость изменения температуры окружающей среды ω_t по формуле (61) настоящего стандарта.

4.7.3. Определяют температуру в момент времени τ

$$t = t_{oc} + \left[\vartheta_{cm}\,\frac{1-\exp\{-a\tau_u\}}{1-\exp\{-a(\tau_u+\tau_\sigma)\}} - \frac{\omega_t}{a}\right]\left[1-\exp\{-a\tau\}\right]. \quad (66)$$

4.8. Расчет теплового режима при периодическом импульсном выделении мощности и температуре окружающей среды, изменяющейся по экспоненциальному закону

4.8.1. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

базовая температура t_0, К;

температура окружающей среды в момент окончания работы блока t_{oc}, К;

стационарный перегрев ϑ_{cm}, К;

длительность импульса τ_u, с;

длительность промежутка между импульсами τ_σ, с;

общее время работы блока τ, с;

темп охлаждения a, 1/с.

Расчет выполняют в порядке, установленном в последующих пунктах.

4.8.2. Определяют темп изменения температуры окружающей среды ξ по формуле (63) настоящего стандарта.

4.8.3. Определяют температуру t в момент времени τ

$$t = \vartheta_{cm} \frac{1-exp\{-a\tau_u\}}{1-exp\{-a(\tau_u+\tau_п)\}}\left[1-exp\{-a\tau\}\right] + \frac{a}{a+\xi}\left[t_{oc}+t_o\frac{\xi}{a}exp\{-a\tau\}\right]. \quad (67)$$

4.9. Расчет теплового режима при апериодическом импульсном выделении мощности

4.9.1. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

базовая температура t_o, К;

стационарный перегрев ϑ_{cm}, К;

длительность каждого импульса τ_{un}, с;

длительность каждого промежутка между импульсами $\tau_{вn}$, с;

темп охлаждения a, 1/с.

Расчет выполняют в порядке, установленном в последующих пунктах.

4.9.2. Определяют температуру t в момент времени τ_n, соответствующий окончаниям импульсов, по рекуррентным формулам:

$$t_{un} = t_o + \vartheta_{cm}\left[1-exp\{-a(\tau_{un}+\tau'_{вn})\}\right], \quad (68)$$

$$\tau' = -ln\left[1-\frac{t_{u(n-1)}-t_o}{\vartheta_{cm}}exp\{-a\tau_{в(n-1)}\}\right]. \quad (69)$$

4.9.3. Определяют температуру t в момент времени τ, отличный от моментов окончания импульса, по рекуррентным формулам:

$$t = t_o + \vartheta_{cm}\left[1-exp\{-a(\tau-\tau_n)-\tau'_{вn}\}\right], \quad (70)$$

$$\tau'_{вn} = -ln\left[1-\frac{t_{u(n-1)}-t_o}{\vartheta_{cm}}exp\{-a\tau_{в(n-1)}\}\right], \quad (71)$$

где τ_n – момент времени, соответствующий началу импульса, с;

t_{n-1} – температура в момент времени, соответствующий концу предыдущего импульса, К;

n – номер импульса.

ПРИЛОЖЕНИЕ I

Обязательное

ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕРМИНОВ, ПРИМЕНЯЕМЫХ В СТАНДАРТЕ

Термин	Определение
Базовая температура	Температура среды, в которой функционируют блоки, шкафы и стойки РЭА в начальный момент времени их работы, либо температура воздуха, подаваемого в блок, шкаф и стойку РЭА при принудительной вентиляции, в начальный момент времени их работы
Блок	По ~~ОСТ4 ГО.010.009~~ ГОСТ 26632-85
Ячейка	По ~~ОСТ4 ГО.410.206~~ ГОСТ 26632-85
Микросборка	По ГОСТ ~~17021-75~~ 26975-86 (4)
Микросхема	По ГОСТ 17021-~~75~~ 88
Коэффициент заполнения блока	Отношение объема всех функциональных и монтажных элементов, находящихся внутри корпуса блока, к внутреннему объему корпуса
Коэффициент перфорации блока	Отношение суммы площадей перфорационных отверстий к сумме площадей верхнего и нижнего основания корпуса блока

Продолжение

Термин	Определение
Плата печатная	По ГОСТ 20406-75
Основание печатной платы	По ГОСТ 20406-75
Теплопроводная шина	Слой из высокотеплопроводного материала (металла), имеющий хороший тепловой контакт с микросборкой (микросхемой) и корпусом блока
Полная площадь поверхности корпуса блока	Площадь внешней поверхности корпуса, включающая площадь поверхности охлаждающих ребер, бортиков и других конструктивных элементов корпуса блока. Допускается не учитывать площадь отдельных мелких выступающих деталей, таких как втулки, винты, штуцера и т.д.
Удельная мощность нагретой зоны	Отношение суммарной мощности, выделяющейся в блоке, к площади нагретой зоны блока

Продолжение

Термин	Определение
Среднеобъемный перегрев нагретой зоны	Вспомогательная величина, физически выражающая перегрев габаритной поверхности нагретой зоны блока
Стационарный тепловой режим	Режим работы блока, при котором температура микросборок, микросхем и дискретных ЭРЭ не изменяется во времени
Нестационарный тепловой режим	Режим работы блока, при котором температура микросборок, микросхем и дискретных ЭРЭ изменяется во времени
Погрешность расчета	Отношение разности между рассчитанным и измеренным перегревами к измеренному перегреву
Температура окружающей среды	Температура среды, в которой функционируют блоки, шкафы и стойки РЭА в момент времени их работы, отличный от начального, либо температура воздуха, подаваемого в блок, шкаф и стойку РЭА при принудительной вентиляции, в момент времени их работы, отличный от начального

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Рекомендуемое

РАСЧЕТ РЕЗУЛЬТИРУЮЩЕЙ МОЩНОСТИ БЛОКА, РАБОТАЮЩЕГО В СОСТАВЕ СТОЙКИ (ШКАФА)

I. Расчет результирующей мощности блока, работающего в составе стойки (шкафа) при естественном воздушном охлаждении

I.I. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

базовая температура t_0, К;

мощность, выделяемая блоками, $Q_{бj}$, Вт;

полная площадь поверхности корпуса стойки (шкафа) S_c, м^2;

коэффициент перфорации корпуса стойки (шкафа) $K_{пс}$;

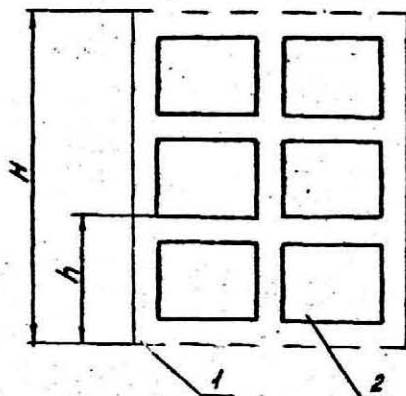
высота корпуса стойки (шкафа) H, м (чертеж);

периметр корпуса стойки (шкафа), измеренный в плоскости, параллельной основаниям стойки (шкафа), P, м;

расстояние от нижнего основания стойки (шкафа) до рассчитываемого блока h, м (см чертеж)

Расчет выполняют в порядке, установленном в последующих пунктах.

Схематическое изображение
стойки (шкафа) РЭА



I - корпус шкафа; 2 - блок

I.2. Определяют удельную мощность корпуса стойки (шкафа) q_c

$$q_c = \frac{\sum_{j=1}^{N} Q_{Бj}}{S_c}, \qquad (1)$$

где N - число блоков в стойке (шкафу).

I.3. Определяют среднеповерхностный перегрев корпуса стойки (шкафа) ϑ_c по формуле (2) настоящего стандарта.

I.4. Определяют лучистый коэффициент теплоотдачи от корпуса стойки (шкафа) $\alpha_{лс}$

$$\alpha_{лс} = \varepsilon_c \, 0{,}227 \left[\frac{\vartheta_c + t_o}{100}\right]^3, \qquad (2)$$

где ε_c - степень черноты поверхности корпуса стойки (шкафа) (определяют по табл.I справочного приложения 6).

I.5. Определяют конвективный коэффициент теплоотдачи от корпуса стойки (шкафа) $\alpha_{к-с}$

$$\alpha_{к-с} = 1{,}6\, \vartheta_c^{0{,}25}, \qquad (3)$$

I.6. Определяют результирующую мощность рассчитываемого блока $Q_{Бр}$:

для стойки (шкафа), состоящей из одного вертикального ряда блоков,

$$Q_{Бр} = Q_Б + \sum_j Q_{Бj} - (\alpha_{лс} + \alpha_{кс})\vartheta_c P h, \qquad (4)$$

где j - индекс, относящийся к блокам, расположенным ниже рассчитываемого и находящимся с ним в одном вертикальном ряду;

для стойки (шкафа), состоящей из двух вертикальных рядов блоков,

$$Q_{бр} = Q_б + \sum_j Q_{бj} - 0,5(\alpha_{лс} + \alpha_{кс})\vartheta_c \rho h. \quad (5)$$

2. Расчет результирующей мощности блока и перегрева микросборок, микросхем и дискретных ЭРЭ, работающих в составе стойки (шкафа) при принудительном воздушном охлаждении

2.1. Для выполнения расчета необходимы следующие исходные данные:

мощность, выделяемая блоками стойки (шкафа), $Q_{бj}$, Вт;

расход охлаждающего воздуха G, кг/с ;

мощность, потребляемая вентилятором, $Q_в$, Вт;

число вертикальных рядов блоков в стойке (шкафу) $N_{в.р}$.

Расчет выполняют в порядке, установленном в последующих пунктах.

2.2. Определяют результирующую мощность рассчитываемого блока $Q_{бр}$:

при приточной вентиляции

$$Q_{бр} = Q_б + \sum_j Q_{бj} + \frac{Q_в}{N_{в.р}}, \quad (6)$$

где j - индекс, относящийся к блокам, расположенным перед рассчитываемым по ходу движения воздуха и находящимся с ним в одном вертикальном ряду;

при вытяжной вентиляции

$$Q_{бр} = Q_б + \sum_j Q_{бj} \quad (7)$$

2.3. Определяют перегрев воздуха для микросборки (микросхемы) и дискретного ЭРЭ $\vartheta_{в}$:

при приточной вентиляции

$$\vartheta_{в} = \frac{N_{в.р}\left(Q_в + \sum_j Q_{бj}\right)}{1000\,G}; \quad (8)$$

при вытяжной вентиляции

$$\vartheta_{в} = \frac{N_{в.р} \sum_j Q_{бj}}{1000\,G}. \quad (9)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

Рекомендуемое

ФОРМУЛЫ ДЛЯ АППРОКСИМАЦИИ ГРАФИЧЕСКОГО МАТЕРИАЛА

Аппроксимирующая формула для определения перегрева корпуса герметичного блока $\vartheta_{ко}$ при давлении окружающей среды 0,I МПа, К (см.черт.4 настоящего стандарта)

$$\vartheta_{ко} = 0{,}1472\, q_{к} - 0{,}2962 \cdot 10^{-3} q_{к}^{2} + 0{,}3127 \cdot 10^{-6} q_{к}^{3} \qquad (1)$$

при $0 < q_{к} \leq 600$ Вт/м^2.

Аппроксимирующие формулы для определения коэффициента $K_{кп}$, учитывающего перфорацию корпуса блока (см.черт.5 настоящего стандарта)

$$K_{кп} = \begin{cases} 0{,}06^{K_п} & 0 \leq K_п \leq 0{,}125 \\ 0{,}82 \cdot 0{,}32^{K_п} & 0{,}125 < K_п \leq 0{,}3 \\ 0{,}74 \cdot 0{,}49^{K_п} & 0{,}3 < K_п \leq 0{,}6 \\ 0{,}6 \cdot 0{,}7^{K_п} & 0{,}6 < K_п \leq 1{,}0 \end{cases} \qquad (2)$$

Аппроксимирующая формула для определения среднеобъемного перегрева нагретой зоны блока в герметичном корпусе $\vartheta_{зо}$ при давлении воздуха внутри блока 0,IМПа и отсутствии внутреннего перемешивания воздуха, К (см.черт.7 настоящего стандарта)

$$\vartheta_{зо} = 0{,}139\, q_{з} - 0{,}1223 \cdot 10^{-3} q_{з}^{2} + 0{,}0698 \cdot 10^{-6} q_{з}^{3} \qquad (3)$$

при $0 < q_{з} \leq 800$ Вт/м^2.

Аппроксимирующая формула для определения коэффициента K_W, учитывающего внутреннее перемешивание воздуха (см.черт.8 настоящего стандарта),

$$K_W = 0{,}08 + \frac{1}{1{,}09 + 0{,}162\,\dfrac{G_в}{V(1-K_з)}} \qquad (4)$$

при $0 < \dfrac{G_в}{V(1-K_з)} \leq 13$ 1/с.

Аппроксимирующие формулы для определения удельной тепловой проводимости контакта теплопроводной шины с корпусом блока $\sigma_{ст}$, Вт/(м^2·К) (см.черт.II настоящего стандарта):

при контакте медной рамки ячейки с алюминиевым корпусом

$$\sigma_{ст} = 0{,}00394P + 270; \qquad (5)$$

при контакте алюминиевой рамки ячейки с алюминиевым корпусом

$$\sigma_{ст} = 0{,}0028P + 270. \qquad (6)$$

Аппроксимирующая формула для определения коэффициента K_α, учитывающего теплоотдачу от корпусов микросборок (микросхем), Вт/(м^2·К) (см.черт.I0 настоящего стандарта)

$$K_\alpha = \frac{23{,}54}{4{,}317 + \lg S_э} \qquad (7)$$

при $0{,}00018 \leq S_э \leq 0{,}006$ м^2.

Аппроксимирующие формулы для определения коэффициента K_{H_1}, учитывающего давление окружающей среды (см.черт.6 настоящего стандарта)

$$K_{H_1} = \begin{cases} 1{,}85 - 0{,}375 \cdot 10^{-4} H_1 & 0{,}1 < H_1 \leq 1333 \text{ Па} \\ 3{,}72 \cdot H_1^{-0{,}1} & 1333 < H_1 \leq 2{,}333 \cdot 10^{4} \text{ Па} \\ 11{,}2 \cdot H_1^{-0{,}21} & 2{,}333 \cdot 10^{4} < H_1 \leq 1{,}013 \cdot 10^{5} \text{ Па}. \end{cases} \qquad (8)$$

Аппроксимирующие формулы для определения коэффициента K_{H_2}, учитывающего давление воздуха внутри корпуса блока (см.черт.9 настоящего стандарта)

$$K_{H_2}=\begin{cases} 1,6 - 0,225\cdot 10^{-4} H_2 & 0,1 < H_2 \leq 1333 \text{ Па} \\ 2,24\, H_2^{-0,05} & 1333 < H_2 \leq 1,333\cdot 10^4 \text{ Па} \\ 6,34\, H_2^{-0,16} & 1,333\cdot 10^4 < H_2 \leq 1,013\cdot 10^5 \text{ Па}. \end{cases} \quad (9)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

Рекомендуемое

ПРОГРАММА РАСЧЕТА ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ БЛОКОВ НА ЭВМ

I. Программа расчета стационарного теплового режима блоков при естественном воздушном охлаждении и внутреннем перемешивании воздуха

Программа предназначена для расчета температуры корпуса и температуры воздуха для микросборок, микросхем и дискретных ЭРЭ, установленных в блоке РЭА и работающих в стационарном тепловом режиме при естественном воздушном охлаждении и внутреннем перемешивании воздуха. Программа представлена на языке PL/1 применительно к транслятору ОС ЕС версии 4.1 на ЭВМ-ЕС-1022.

Числовой материал, необходимый для расчета на языке PL/1 задается в следующем порядке:

N - число микросборок (микросхем) и дискретных ЭРЭ, окружающих рассчитываемую микросборку (микросхему) и установленных с ней на одной ячейке;

N1 - число блоков, работающих в составе стойки (шкафа);

N4 - признак, указывающий, что необходимо рассчитывать температуру микросборки (микросхемы) или дискретного ЭРЭ:

N4 = 0 - расчет для дискретного ЭРЭ;

N4 = 1 - расчет для микросборки (микросхемы);

T0 - базовая температура;

QB(N1) - массив мощностей, выделяемых блоками стойки (шкафа);

ПРИЛОЖЕНИЕ 5

Рекомендуемое

ПРИМЕРЫ РАСЧЕТА

I. Блок РЭА в оребренном корпусе типоразмера I,5К по ГОСТ 17045-71 состоит из четырех ячеек без теплопроводных шин, на которых установлены микросборки в корпусах К421.48-2. Микросборки приклеены к печатным платам с одной стороны и каждая из них выделяет одинаковую мощность. Верхнее и нижнее основания корпуса блока имеют перфорационные отверстия. Определить температуру корпуса микросборки при естественном воздушном охлаждении, отсутствии внутреннего перемешивания воздуха и нормальном давлении окружающей среды.

Исходные данные для расчета (см.п.3.I.I настоящего стандарта):

базовая температура t_0 = 295 К;

мощность, выделяющаяся в блоке, $Q_б$=45 Вт;

мощность, выделяющаяся в микросборках, $Q_э$ =I,25 Вт;

размеры корпуса блока без учета теплоотдающих ребер

$L_{кx}$= 0,319 м, L_{ky}=0,194 м, $L_{кz}$=0,094 м;

общая площадь внешней поверхности корпуса блока

$S_к$ = 0,3682 м^2;

суммарная площадь поверхности микросборки и радиатора

$S_э$ = 0,0022 м^2;

площадь основания микросборки $S_{эо}$ = 0,000864 м^2;

размеры печатной платы ячейки l_x = 0,205 м, l_y=0,17 м;

расстояние между крайними ячейками в блоке l_z =0,068 м;

коэффициент перфорации корпуса блока $K_п$ = 0,25;

толщина печатной платы δ_n = 0,0015 м;

зазор между основанием микросборки и печатной платой δ_3 = 0,0001 м;

коэффициент теплопроводности диэлектрического основания печатной платы λ_1 = 0,372 Вт/(м·К);

коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между микросборкой и печатной платой, λ_3 = 1,0 Вт/(м·К);

расстояния между центром рассчитываемой микросборки и центрами остальных микросборок на печатной плате

r_1 = 0,05 м; r_2 = 0,09 м; r_3 = 0,1 м; r_4 = 0,13 м; r_5 = 0,105м;
r_6 = 0,095 м; r_7 = 0,105 м; r_8 = 0,06 м; r_9 = 0,04 м;

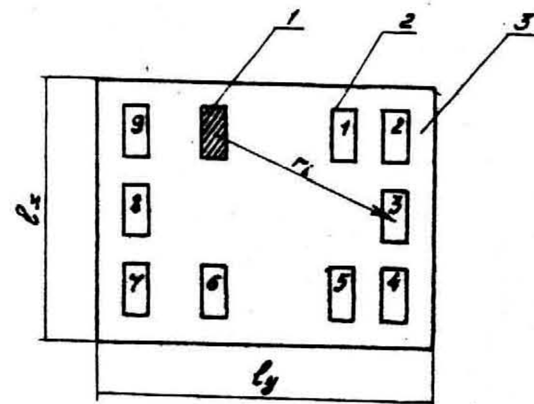
шаг установки микросборок в ячейке t_x = 0,039 м,
t_y = 0,047 м;

давление окружающей среды H_1 = 10^5 Па;

давление воздуха внутри корпуса блока H_2 = 10^5 Па;

топология ячейки блока представлена на черт.1.

Топология ячейки



1 – рассчитываемая микросборка; 2 – i-я микросборка;
3 – печатная плата

Черт.1

Расчет выполняют в следующем порядке:

определяют удельную мощность блока по формуле (I) настоящего стандарта

$$q_к = \frac{45}{0,3682} = I22,2 \ Вт/м^2 . \qquad (I)$$

Определяют перегрев корпуса герметичного блока при давлении окружающей среды 0,I МПа по черт.4 настоящего стандарта

$$\vartheta_{ко} = I4,I \ К .$$

Определяют коэффициент, учитывающий перфорацию корпуса блока, по черт.5 настоящего стандарта

$$K_{кп} = 0,6I7 .$$

Определяют коэффициент, учитывающий давление окружающей среды, по черт.6 настоящего стандарта

$$K_{н_1} = I,0 .$$

Определяют перегрев корпуса блока по формуле (2) настоящего стандарта

$$\vartheta_к = I4,I \ 0,6I7 \ I,0 = 8,7 \ К . \qquad (2)$$

Определяют удельную мощность нагретой зоны блока по формуле (3) настоящего стандарта

$$q_з = \frac{45}{2\left[0,3I9 \ 0,I94 + \left(\frac{I}{0,3I9} + \frac{I}{0,I94}\right) 0,205 \cdot 0,I7 \cdot 0,068\right]} =$$

$$= 276 \ Вт/м^2 . \qquad (3)$$

Определяют среднеобъемный перегрев нагретой зоны блока в герметичном корпусе при давлении воздуха внутри блока 0,I МПа и отсутствии внутреннего перемешивания воздуха по черт.7 настоящего стандарта

$$\vartheta_{зо} = 30,5 \ К .$$

Определяют коэффициент, учитывающий давление воздуха внутри блока, по черт.9 настоящего стандарта

$$K_{н_2} = I,0 .$$

Определяют среднеобъемный перегрев нагретой зоны блока при K_w = I по формуле (4) настоящего стандарта

$$\vartheta_з = 8,7 + (30,5 - I4,I) \ 0,6I7 \cdot I,0 \cdot I,0 = I8,8 \ К . \qquad (4)$$

Определяют среднеобъемный перегрев воздуха внутри блока по формуле (5) настоящего стандарта

$$\vartheta_в = \frac{I8,8 + 8,7}{2} = I3,7 \ К . \qquad (5)$$

Определяют эквивалентный радиус микросборки по формуле (I2) настоящего стандарта

$$R = \sqrt{\frac{0,000864}{3,I4}} = 0,0I66 \ м . \qquad (6)$$

Определяют параметр m по формуле (I3) настоящего стандарта

$$m = \sqrt{\frac{2\left(4,5\sqrt{\frac{I0^5}{I0^5}} + 4,0\right)}{0,00I5 \cdot 0,372}} = I74,5 \ 1/м . \qquad (7)$$

Определяют значения аргументов Бесселевых функций для рассчитываемой микросборки и остальных микросборок ячейки

$$
\begin{aligned}
&mR = 174{,}5\cdot 0{,}0166 = 2{,}9 && mr_5 = 174{,}5\cdot 0{,}105 = 18{,}3\\
&mr_1 = 174{,}5\cdot 0{,}05 = 8{,}7 && mr_6 = 174{,}5\cdot 0{,}095 = 16{,}6\\
&mr_2 = 174{,}5\cdot 0{,}09 = 15{,}7 && mr_7 = 174{,}5\cdot 0{,}105 = 18{,}3 \qquad (8)\\
&mr_3 = 174{,}5\cdot 0{,}1 = 17{,}4 && mr_8 = 174{,}5\cdot 0{,}06 = 10{,}5\\
&mr_4 = 174{,}5\cdot 0{,}13 = 22{,}7 && mr_9 = 174{,}5\cdot 0{,}04 = 7{,}0.
\end{aligned}
$$

Определяют значения Бесселевых функций по таблице справочного приложения 7 настоящего стандарта

$$
\begin{aligned}
&K_1(mR) = 0{,}04529 && K_0(mr_1) = 0{,}00006983 && K_0(mr_6) = 0\\
&K_0(mR) = 0{,}03901 && K_0(mr_2) = 0 && K_0(mr_7) = 0\\
& && K_0(mr_3) = 0 && K_0(mr_8) = 0 \qquad (9)\\
& && K_0(mr_4) = 0 && K_0(mr_9) = 0{,}0004248.\\
& && K_0(mr_5) = 0 &&
\end{aligned}
$$

Определяют коэффициент, учитывающий теплоотдачу от корпуса микросборки, по черт. 11 настоящего стандарта

$$K_\alpha = 14{,}2\ \text{Вт}/(\text{м}^2\cdot\text{К}).$$

Определяют собственный перегрев корпуса микросборки при К = 1,14 по формуле (14) настоящего стандарта

$$\vartheta_{\kappa} = 1{,}14\left[\frac{1{,}25}{\left[(14{,}2\cdot 4)\sqrt{\frac{10^5}{10^5}}+4\right](0{,}0022-0{,}000864)+\frac{1}{\frac{0{,}0001}{1\cdot 3{,}14\cdot 0{,}0166^2}+\frac{1}{\left(4{,}5\sqrt{\frac{10^5}{10^5}}+4\right)3{,}14\cdot 0{,}0166^2+2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}0166\cdot 0{,}572\cdot 0{,}00015\cdot 174{,}5\,\frac{0{,}04529}{0{,}03901}}}}\right] = 37{,}4\ K \qquad (10)$$

Определяют предельный радиус взаимного теплового влияния для микросборки по формуле (15) настоящего стандарта

$$r_{np} = \frac{1}{174{,}5\left[0{,}105\,\frac{0{,}03901+4\cdot 0{,}0001811}{\frac{1}{0{,}039}+\frac{1}{0{,}047}}\cdot 174{,}5+0{,}155\right]} = 0{,}033\ \text{м}. \qquad (11)$$

Так как все $r_i > r_{np}$, то наведенный перегрев для микросборки не рассчитывается.

Определяют перегрев корпуса микросборки относительно базовой температуры по формуле (17) настоящего стандарта

$$\vartheta_э = 13{,}7 + 37{,}4 = 51{,}1\ \text{К}. \qquad (12)$$

Определяют температуру корпуса микросборки по формуле (18) настоящего стандарта

$$t_э = 51{,}1 + 295 = 346{,}1\ \text{К}. \qquad (13)$$

2. Герметичный блок РЭА состоит из 6 ячеек, на которых установлены теплопроводные шины в виде медных полос толщиной 0,002 м. На теплопроводных шинах равномерно расположены микросборки в корпусах К 401.14-3. Микросборки приклеены к теплопроводным шинам и имеют одинаковую мощность тепловыделения. Определить перегрев корпуса микросборки относительно температуры корпуса блока при нормальном давлении воздуха внутри блока.

Исходные данные для расчета (см.п.3.I.I настоящего стандарта):

мощность, выделяющаяся в микросборках, $Q_э$ = 0,5 Вт;

суммарная площадь поверхности микросборки и радиатора $S_э$ = 0,000185 м^2;

площадь основания микросборки $S_{эо}$ = 0,00007 м^2;

размеры печатной платы ячейки ℓ_x =0,2 м; ℓ_y=0,I6 м;

зазор между основанием микросборки и теплопроводной шиной $\delta_з$ = 0,00005 м;

коэффициент теплопроводности материала теплопроводных шин печатной платы λ_2 =400 Вт/(м·К);

коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между микросборкой и теплопроводной шиной, λ_3 = I,0 Вт/(м·К);

расстояние между печатными платами соседних ячеек $\Delta_п$ = 0,007 м;

ширина теплопроводной шины $\ell_ш$ = 0,0I м;

площадь поперечного сечения теплопроводной шины $f_ш$ = 0,00002 м^2;

длины теплопроводной шины от корпуса блока до корпуса микросборки :

для рассчитываемой микросборки ℓ_1 =0,056 м, ℓ_2 =0,094 м;

для микросборки №I ℓ_1 = 0,003 м, ℓ_2 = 0.I47 м;

для микросборки №2 ℓ_1 = 0,0I9 м, ℓ_2 = 0,I3I м;

для микросборки №3 ℓ_1 = 0,035 м, ℓ_2 = 0,II5 м;

для микросборки №4 ℓ_1 = 0,067 м, ℓ_2 = 0,083 м;

для микросборки №5 ℓ_1 = 0,083 м, ℓ_2 = 0,067 м;

для микросборки №6 ℓ_1 = 0,099 м, ℓ_2 = 0,05I м;

для микросборки №7 ℓ_1 = 0,II5 м, ℓ_2 =0,035 м;

для микросборки №8 ℓ_1 = 0,I3I м; ℓ_2 =0,0I9 м;

для микросборки №9 ℓ_1 = 0,I47 м, ℓ_2 =0,003 м;

число микросборок, окружающих рассчитываемую микросборку и установленных с ней на одной теплопроводной шине, $N_ш$ =9;

расстояния от рассчитываемой микросборки до остальных микросборок, установленных на теплопроводной шине,

x_1 = 0,038 м; x_2 = 0,022 м; x_3 = 0,006 м;
x_4 = 0,006 м; x_5 = 0,022 м; x_6 = 0,038 м;
x_7 = 0,054 м; x_8 = 0,07 м; x_9 = 0,086 м;

длина отрезка теплопроводной шины от корпуса блока до микросборки с индексом i, на котором расположена рассчитываемая микросборка :

для микросборки №I ℓ_{i_1} = 0,I47 м;

для микросборки №2 ℓ_{i_2} = 0,I3I м;

для микросборки №3 ℓ_{i_3} = 0,II5 м;

для микросборки №4 ℓ_{i_4} = 0,067 м;

для микросборки №5 ℓ_{i_5} = 0,083 м;

для микросборки №6 ℓ_{i_6} = 0,099 м;

для микросборки №7 ℓ_{i_7} = 0,II5 м;

для микросборки №8 ℓ_{i_8} = 0,I3I м;

для микросборки №9 ℓ_{i_9} = 0,I47 м;

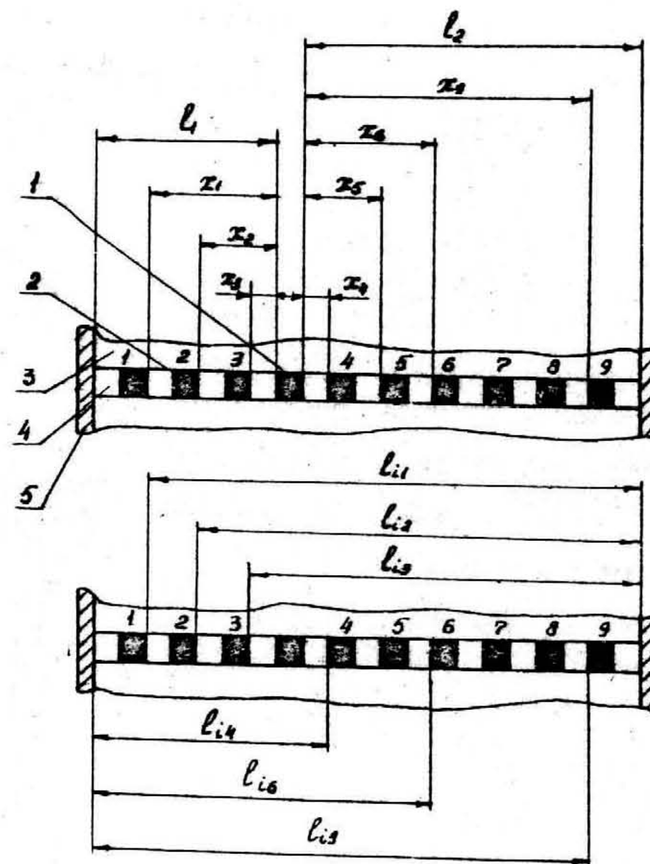
давление воздуха внутри корпуса блока H_2 =10^{5}Па;

половина площади кондуктивного теплообмена теплопроводной шины с корпусом блока F = 0,0006 м^2;

усилие прижатия ячейки к корпусу блока $P = 0$;

топология ячейки блока представлена на черт.2 настоящего приложения.

Топология микросборок
на теплопроводной шине ячейки



I - рассчитываемая микросборка; 2 - микросборка, окружающая рассчитанную микросборку и установленная с ней на одной теплопроводной шине; 3 - печатная плата; 4 - теплопроводная шина; 5 - корпус блока

Черт.2

Расчет выполняют в следующем порядке.

Определяют коэффициент, учитывающий теплоотдачу от корпуса микросборки, по черт.11 настоящего стандарта

$$K_\alpha = 40{,}3\ \text{Вт/(м}^2\cdot\text{К)}.$$

Определяют тепловую проводимость от микросборки к корпусу блока через воздух внутри блока по формуле (6) настоящего стандарта

$$\sigma_k = \frac{\left(4{,}5\sqrt{\frac{10^5}{10^5}}+4\right)(2\cdot 0{,}16+0{,}2)\cdot 0{,}007\cdot 40{,}3(0{,}000185-0{,}00007)}{\left(4{,}5\sqrt{\frac{10^5}{10^5}}+4\right)(2\cdot 0{,}16+0{,}2)\cdot 0{,}007+40{,}3(0{,}000185-0{,}00007)} = \quad (14)$$

$$= 0{,}004\ \text{Вт/К}.$$

Так как микросборки установлены в одинаковых корпусах, то $\sigma_k = idem$ для всех микросборок.

Определяют тепловую проводимость от рассчитываемой микросборки к корпусу блока по теплопроводной шине по формуле (7) настоящего стандарта при $\sigma_{ст} = 270$ Вт/(м$^2\cdot$К)

$$\sigma_ш = \frac{270\cdot 0{,}0006\cdot 400\cdot 0{,}00002}{400\cdot 0{,}00002+270\cdot 0{,}0006\cdot 0{,}056} + \frac{400\cdot 0{,}00002\cdot 270\cdot 0{,}0006}{400\cdot 0{,}00002+270\cdot 0{,}0006\cdot 0{,}094} = \quad (15)$$

$$= 0{,}13\ \text{Вт/К}.$$

Определяют отношение тепловых проводимостей по формуле (8) настоящего стандарта

$$\mathcal{D} = \frac{0{,}004}{0{,}13} = 0{,}03. \quad (16)$$

Так как $\mathcal{D} < 0{,}25$, дальнейший расчет производят в порядке, установленном в пп.3.1.13–3.1.22 настоящего стандарта.

Определяют собственный перегрев корпуса рассчитываемой микросборки по формуле (21) настоящего стандарта

$$\vartheta_{эс} = \frac{0{,}5}{0{,}004+0{,}13} = 3{,}7\ \text{К}. \quad (17)$$

Определяют тепловую проводимость от микросборок 1 и 9 к корпусу блока по теплопроводной шине по формуле (7) настоящего стандарта при $\sigma_{ст} = 270$ Вт/(м$^2\cdot$К)

$$\sigma_{ш_1} = \sigma_{ш_9} = \frac{270\cdot 0{,}0006\cdot 400\cdot 0{,}00002}{400\cdot 0{,}00002+270\cdot 0{,}0006\cdot 0{,}003} + \frac{270\cdot 0{,}0006\cdot 400\cdot 0{,}00002}{400\cdot 0{,}00002+270\cdot 0{,}0006\cdot 0{,}147} =$$

$$= 0{,}19\ \text{Вт/К}. \quad (18)$$

Определяют тепловую проводимость от микросборок 2 и 8 к корпусу блока по теплопроводной шине по формуле (7) настоящего стандарта при $\sigma_{ст} = 270$ Вт/(м$^2\cdot$К)

$$\sigma_{ш_2} = \sigma_{ш_8} = \frac{270\cdot 0{,}0006\cdot 400\cdot 0{,}00002}{400\cdot 0{,}00002+270\cdot 0{,}0006\cdot 0{,}019} + \frac{270\cdot 0{,}0006\cdot 400\cdot 0{,}00002}{400\cdot 0{,}00002+270\cdot 0{,}0006\cdot 0{,}131} =$$

$$= 0{,}16\ \text{Вт/К}. \quad (19)$$

Определяют тепловую проводимость от микросборок 3 и 7 к корпусу блока по теплопроводной шине по формуле (7) настоящего стандарта при $\sigma_{ст} = 270$ Вт/(м$^2\cdot$К)

$$\sigma_{ш_3}=\sigma_{ш_8}=\frac{270\cdot 0,0006\cdot 400\cdot 0,00002}{400\cdot 0,00002+270\cdot 0,0006\cdot 0,035}+\frac{270\cdot 0,0006\cdot 400\cdot 0,00002}{400\cdot 0,00002+270\cdot 0,0006\cdot 0,115}=$$

$$= 0,14 \text{ Вт/К} . \qquad (20)$$

Определяют тепловую проводимость от микросборки 6 к корпусу блока по теплопроводной шине по формуле (7) настоящего стандарта при $\sigma_{ст}$=270 Вт/(м^2 К)

$$\sigma_{ш_6}=\frac{270\cdot 0,0006\cdot 400\cdot 0,00002}{400\cdot 0,00002+270\cdot 0,0006\cdot 0,099}+\frac{270\cdot 0,0006\cdot 400\cdot 0,00002}{400\cdot 0,00002+270\cdot 0,0006\cdot 0,051}=$$

$$= 0,13 \text{ Вт/К} . \qquad (21)$$

Определяют тепловую проводимость от микросборок 4 и 5 к корпусу блока по теплопроводной шине по формуле (7) настоящего стандарта при $\sigma_{ст}$=270 Вт/(см^2 К)

$$\sigma_{ш_4}=\sigma_{ш_5}=\frac{270\cdot 0,0006\cdot 400\cdot 0,00002}{400\cdot 0,00002+270\cdot 0,0006\cdot 0,067}+\frac{270\cdot 0,0006\cdot 400\cdot 0,00002}{400\cdot 0,00002+270\cdot 0,0006\cdot 0,083}=$$

$$= 0,13 \text{ Вт/К} . \qquad (22)$$

Определяют наведенный перегрев от микросборки 1 по формуле (22) настоящего стандарта при $\sigma_{ст}$=270 Вт/(м^2 К)

$$\vartheta_{эф_1}=\frac{0,5}{0,19+0,004}\cdot\frac{\left(1+\frac{270\cdot 0,147}{400}\right)-\frac{270\cdot 0,038}{400}}{\left(1+\frac{270\cdot 0,147}{400}\right)}=2,5 \text{ К} . \qquad (23)$$

Определяют наведенный перегрев от микросборки 2 по формуле (22) настоящего стандарта при $\sigma_{ст}$=270 Вт/(м^2·К)

$$\vartheta_{эф_2}=\frac{0,5}{0,16+0,004}\cdot\frac{\left(1+\frac{270\cdot 0,131}{400}\right)-\frac{270\cdot 0,022}{400}}{\left(1+\frac{270\cdot 0,131}{400}\right)}=3,0 \text{ К} . \qquad (24)$$

Определяют наведенный перегрев от микросборки 3 по формуле (22) настоящего стандарта при $\sigma_{ст}$=270 Вт/(м^2·К)

$$\vartheta_{эф_3}=\frac{0,5}{0,14+0,004}\cdot\frac{\left(1+\frac{270\cdot 0,115}{400}\right)-\frac{270\cdot 0,006}{400}}{\left(1+\frac{270\cdot 0,115}{400}\right)}=3,4 \text{ К} . \qquad (25)$$

Определяют наведенный перегрев от микросборки 4 по формуле (22) настоящего стандарта при $\sigma_{ст}$=270 Вт/(м^2·К)

$$\vartheta_{эф_4}=\frac{0,5}{0,13+0,004}\cdot\frac{\left(1+\frac{270\cdot 0,067}{400}\right)-\frac{270\cdot 0,006}{400}}{\left(1+\frac{270\cdot 0,067}{400}\right)}=3,7 \text{ К} . \qquad (26)$$

Определяют наведенный перегрев от микросборки 5 по формуле (22) настоящего стандарта при $\sigma_{ст}$=270 Вт/(м^2·К)

$$\vartheta_{эф_5}=\frac{0,5}{0,13+0,004}\cdot\frac{\left(1+\frac{270\cdot 0,083}{400}\right)-\frac{270\cdot 0,022}{400}}{\left(1+\frac{270\cdot 0,083}{400}\right)}=3,7 \text{ К} . \qquad (27)$$

Определяют наведенный перегрев от микросборки 6 по формуле (22) настоящего стандарта при $\sigma_{ст}$ =270 Вт/(м^2·К)

$$\vartheta_{эф_6}=\frac{0,5}{0,13+0,004}\cdot\frac{\left(1+\frac{270\cdot 0,099}{400}\right)-\frac{270\cdot 0,038}{400}}{\left(1+\frac{270\cdot 0,099}{400}\right)}=3,6 \text{ К} . \qquad (28)$$

Определяют наведенный перегрев от микросборки 7 по формуле (22) настоящего стандарта при $\sigma_{ст}$=270 Вт/(м^2·К)

$$\vartheta_{эр_7} = \frac{0,5}{0,I4+0,004} \cdot \frac{\left(I+\frac{270\cdot 0,II5}{400}\right) - \frac{270\cdot 0,054}{400}}{\left(I+\frac{270\cdot 0,II5}{400}\right)} = 3,3 \text{ К} . \quad (29)$$

Определяют наведенный перегрев от микросборки 8 по формуле (22) настоящего стандарта при $\sigma_{ст} = 270$ Вт/(м$^2\cdot$К)

$$\vartheta_{эр_8} = \frac{0,5}{0,I6+0,004} \cdot \frac{\left(I+\frac{270\cdot 0,I3I}{400}\right) - \frac{270\cdot 0,07}{400}}{\left(I+\frac{270\cdot 0,I3I}{400}\right)} = 2,9 \text{ К} . \quad (30)$$

Определяют наведенный перегрев от микросборки 9 по формуле (22) настоящего стандарта при $\sigma_{ст}=270$ Вт/(м$^2\cdot$К)

$$\vartheta_{эр_9} = \frac{0,5}{0,I9+0,004} \cdot \frac{\left(I+\frac{270\cdot 0,I47}{400}\right) - \frac{270\cdot 0,086}{400}}{\left(I+\frac{270\cdot 0,I47}{400}\right)} = 2,4 \text{ К} . \quad (3I)$$

Определяют перегрев корпуса микросборки относительно базовой температуры по формуле (22) настоящего стандарта

$$\vartheta_{о}-\vartheta_{к}=3,7+2,5+3,0+3,4+3,7+3,7+3,6+3,3+2,9+2,4=32 \text{ К} . \quad (32)$$

3. Блок РЭА в корпусе типоразмера I,5 К по ГОСТ I7045-7I состоит из пяти ячеек без теплопроводных шин, на которых установлены микросборки в корпусах К 42I.48-2. Микросборки приклеены к печатным платам с одной стороны и каждая из них выделяет одинаковую мощность. Определяют температуру корпуса микросборки при принудительном воздушном охлаждении.

Исходные данные для расчета (см.п.3.2.I настоящего стандарта):

базовая температура $t_о = 295$ К;

мощность, выделяющаяся в блоке, $Q_Б = 45$ Вт;

расход охлаждающего воздуха $G = 0,034$ кг/с;

размер печатной платы, перпендикулярный направлению движения воздуха, $\ell_y = 0,205$ м;

зазор между печатными платами $\Delta_{п_1} = 0,008$ м; $\Delta_{п_2} = 0,0II$ м;

размеры микросборки $\ell_{эу} = 0,024$ м, $\ell_{эz} = 0,004$ м;

расстояние от торца печатной платы до центра рассчитываемой микросборки в направлении движения воздуха $x = 0,04$ м;

количество печатных плат в блоке $N_п = 5$;

количество микросборок в сечении воздушного зазора между ячейками на расстоянии x

$n_{x_1} = 3$;

$n_{x_2} = 4$;

толщина печатной платы $\delta_п = 0,00I5$ м;

зазор между основанием микросборки и печатной платой $\delta_з = 0,000I$ м;

коэффициент теплопроводности диэлектрического основания печатной платы $\lambda_1 = 0,372$ Вт/(м$\cdot$К);

коэффициент теплопроводности материала, заполняющего зазор между микросборкой и печатной платой, $\lambda_з = I,0$ Вт/(м$\cdot$К);

расстояние между центром рассчитываемой микросборки и центрами соседних микросборок на печатной плате (см.черт.I настоящего приложения)

r_1 = 0,05 м; r_2 =0,09 м; r_3 = 0,I м; r_4 = 0,I3 м;
r_5 = 0,I05 м; r_6 = 0,095 м; r_7 = 0,I05 м; r_8 = 0,06 м; r_9 = 0,04 м;

суммарная площадь поверхности микросборки и радиатора

$S_э$ = 0,0022 м^2;

площадь основания микросборки $S_{эо}$ = 0,000864 м^2;

шаг установки микросборок в ячейке t_x= 0,039 м, t_y=0,047 м;

зазор между ячейками и корпусом блока γ =0,02 м.

Расчет выполняют в следующем порядке:

Определяют площадь свободного сечения воздушного зазора между ячейками на расстоянии x по формуле (33) настоящего стандарта

$$f_{яс_1}=(0,205+2\cdot 0,02)\cdot 0,008-3\cdot 0,024\cdot 0,004=0,00I672\ м^2. \qquad (33)$$

Определяют эквивалентный диаметр воздушного зазора между ячейками по формуле (34) настоящего стандарта

$$d_{экв}=\frac{2\cdot 0,00I672}{0,205+0,008\ +\ 3\cdot 0,004}=0,0I5\ м. \qquad (34)$$

Определяют перегрев воздуха для рассчитываемой микросборки по формуле (36) настоящего стандарта

$$\vartheta_{в_1}=\frac{(5+I)\cdot 0}{I000\cdot 0,034}=0, \qquad (35)$$

так как перед рассчитываемой микросборкой по направлению воздушного потока отсутствуют другие микросборки и дискретные ЭРЭ.

Определяют температуру воздуха для рассчитываемой микросборки по формуле (37) настоящего стандарта

$$t_{в_1}=295+\frac{(5+I)\cdot 0}{I000\cdot 0,034}=295\ К. \qquad (36)$$

Определяют коэффициент динамической вязкости воздуха при температуре $t_{в_1}$ по табл.2 справочного приложения 6

μ = 0,0000I83 Па с .

Определяют значение критерия Рейнольдса по формуле (38) настоящего стандарта

$$Re_1=\frac{0,034\cdot 0,0I5}{0,0000I83\cdot 0,00I672\cdot (5+I)}=2778. \qquad (37)$$

Определяют коэффициент теплопроводности воздуха при температуре $t_{в_1}$ по табл.2 справочного приложения 6

$\lambda_в$ = 0,026 Вт/(м·К) .

Определяют коэффициент теплоотдачи в воздушном зазоре между ячейками, в котором установлена рассчитываемая микросборка, по формуле (44) настоящего стандарта

$$\alpha_1=0,026\ \frac{0,026}{0,0I5}\ 2778^{0,8}=25,6\ Вт/(м^2\cdot К). \qquad (38)$$

Определяют площадь свободного сечения воздушного зазора, примыкающего к обратной стороне ячейки с рассчитываемой микросборкой, по формуле (33) настоящего стандарта

$$f_{лс_2} = (0{,}205+2\cdot 0{,}02)\cdot 0{,}0II - 4\cdot 0{,}024\cdot 0{,}004 = 0{,}0023II \text{ м}^2 . \quad (39)$$

Определяют эквивалентный диаметр воздушного зазора, примыкающего к обратной стороне ячейки с рассчитываемой микросборкой, по формуле (34) настоящего стандарта

$$d_{экв_2} = \frac{2\cdot 0{,}0023II}{0{,}205+0{,}0II+4\cdot 0{,}004} = 0{,}02 \text{ м} . \quad (40)$$

Определяют значение критерия Рейнольдса для воздушного зазора, примыкающего к обратной стороне ячейки с рассчитываемой микросборкой, по формуле (38) настоящего стандарта

$$Re_2 = \frac{0{,}034\cdot 0{,}02}{0{,}0000I83\cdot 0{,}0023II\cdot(5+I)} = 2679 . \quad (4I)$$

Определяют коэффициент теплоотдачи в воздушном зазоре, примыкающем к обратной стороне ячейки с рассчитываемой микросборкой, по формуле (44) настоящего стандарта

$$\alpha_2 = 0{,}026\,\frac{0{,}026}{0{,}02}\,2679^{0{,}8} = I8{,}7 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)} . \quad (42)$$

Определяют эквивалентный радиус рассчитываемой микросборки по формуле (I2) настоящего стандарта

$$R = \sqrt{\frac{0{,}000864}{3{,}I4}} = 0{,}0I66 \text{ м} . \quad (43)$$

Определяют параметр m по формуле (47) настоящего стандарта при $\lambda_{экв} = \lambda_1$

$$m = \sqrt{\frac{25{,}6 + I8{,}7 + 8}{0{,}00I5\cdot 0{,}372}} = 306 \text{ I/м}. \quad (44)$$

Определяют значение аргумента Бесселевых функций для рассчитываемой микросборки

$$mR = 306\cdot 0{,}0I66 = 5{,}08 . \quad (45)$$

Определяют значение Бесселевых функций для рассчитываемой микросборки по таблице справочного приложения 4 настоящего стандарта

$$K_1(mR) = 0{,}0036I9; \quad K_0(mR) = 0{,}003308 .$$

Определяют собственный перегрев корпуса рассчитываемой микросборки по формуле (49) настоящего стандарта

$$\vartheta_{ж} = \frac{1{,}25}{(25{,}6+4)(0{,}0022-0{,}000864)+\dfrac{1}{\dfrac{0{,}0001}{1\cdot 3{,}14\cdot 0{,}0166^2}+\dfrac{1}{(18{,}7+4)3{,}14\cdot 0{,}0166^2+2\cdot 3{,}14\cdot 0{,}0166\cdot 0{,}0015\cdot 0{,}372\cdot 306\dfrac{0{,}003619}{0{,}003308}}}}$$

$$= I5{,}9 \text{ К}. \quad (46)$$

Определяют предельный радиус взаимного теплового влияния для рассчитываемой микросборки по формуле (I5) настоящего стандарта

$$r_{пр} = \frac{I}{306\left[0{,}I05\,\dfrac{0{,}003308+0}{\dfrac{I}{0{,}039}+\dfrac{I}{0{,}047}}\,306+0{,}I55\right]} = 0{,}02 \text{ м} . \quad (47)$$

Так как все $r_i > r_{пр}$, то наведенный перегрев для микросборки не учитывается.

Определяют температуру корпуса рассчитываемой микросборки по формуле (5I) настоящего стандарта

$$t_э = 295+15,9 = 310,9 \text{ К}. \quad (48)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ 6

Справочное

СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ И СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ЕДИНИЦАМИ ДАВЛЕНИЯ

Таблица I

Степень черноты полного нормального излучения для различных материалов

Материал	Температура t, К	Степень черноты
Алюминиевая краска	373	0,28
Алюминиевая краска после нагрева до 598 К	473	0,35
Алюминиевая фольга (без масла)	473–873	0,09
Алюминиевая фольга, покрытая слоем масла	373	0,56
Алюминиевый лак на шероховатой пластине	293–373	0,39
Алюминий грубополированный	298	0,I8
Алюминий полированный	296	0,04–0,06
Алюминий сильно окисленный	473–873	0,20–0,30
Алюминий с шероховатой поверхностью	298	0,06–0,07
Алюминия окись, величина зерен, мкм: I–2	473–873	0,23
2–4		0,29

Продолжение табл.I

Материал	Температура t,К	Степень черноты
Асбестовая бумага, ткань	313-643	0,93
Асбестовый картон	296	0,96
Бронза полированная	523	0,16
Бронзовая краска	373	0,51
Бумага тонкая, наклеенная на пластину	292	0,92
Вольфрам	300-3588	0,05
Гипс	294	0,80-0,90
Графит	298	0,70-0,80
Дюралюминий (Д16)	323-623	0,37-0,41
Железо полированное	698-1298	0,14-0,38
Железо свежеобработанное наждаком	293	0,24
Золото	498-898	0,10
Золото тщательно полированное	498-898	0,02-0,03
Ковар	298	0,80-0,85
Краска защитно-зеленая	293	0,90
Краски эмалевые	293-373	0,92
Лак белый	313-373	0,80-0,98
Лак черный блестящий	313-373	0,87
Лак черный матовый	313-1000	0,80-0,96
Латунь листовая прокатанная	295	0,06

Продолжение табл.I

Материал	Температура t,К	Степень черноты
Латунь матовая тусклая	323-623	0,22
Латунь, окисленная при 873 К	473-818	0,59-0,61
Латунь полированная	373	0,03
Латунь прокатанная	295	0,20
Магния окись	313-473	0,20
Масляные краски различных цветов	373	0,92-0,96
Медь окисленная	298	0,60-0,70
Медь полированная	295	0,02
Медь торговая, шабренная до блеска	295	0,07
Медь шлифованная	293	0,03
Муар серый	293	0,89
Муар черный	293	0,90
Никель, окисленный при 873 К	473-873	0,37-0,48
Никель (проволока)	458-1323	0,44
Никель технически чистый полированный	498-648	0,07-0,09
Никеля окись	923-1523	0,59-0,86
Нихромовая проволока чистая	323-1308	0,70-0,79
Олово (луженое кровельное железо)	373	0,07-0,09
Платина чистая полированная	498-898	0,05-0,10
Платиновые изделия: лента	1198-1898	0,12-0,17
нить	298-1498	0,04-0,19
проволока	298-1648	0,07-0,18

Продолжение табл.I

Материал	Температура t, К	Степень черноты
Резина мягкая, серая, шероховатая	297	0,86
Резина твердая	296	0,95
Сажа ламповая	294	0,96
Серебро чистое полированное	498–898	0,02–0,03
Сталь никелированная матовая	366	0,II
Стальное литье полированное	293	0,52–0,56
Сталь, окисленная при 873 К	473–873	0,80
Стекло	295	0,90–0,94
Фарфор глазурованный	295	0,92
Хром полированный	313–1639	0,10
Цинк	40I	0,23–0,27
Цинк продажный (99,1%) полированный	500–600	0,04–0,05
Пластмасса	293	0,92

Таблица 2

Физические свойства сухого воздуха при давлении 0,I МПа

t, К	$C_p \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)	$\lambda_B \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^5$, Па с
223	I,0I3	2,035	I,462
233	I,0I3	2,II8	I,5I5
243	I,0I3	2,I98	I,570
253	I,009	2,280	I,620
263	I,009	2,36I	I,669
273	I,005	2,442	I,7I8
278	I,005	2,47I	I,74I
283	I,005	2,5I4	I,767
288	I,005	2,546	I,79I
293	I,005	2,586	I,8I5
298	I,005	2,627	I,84I
303	I,005	2,674	I,865
308	I,005	2,7I5	I,885
3I3	I,005	2,756	I,9I0
3I8	I,005	2,784	I,935
323	I,005	2,8I9	I,963
328	I,006	2,854	I,985
333	I,007	2,888	2,0I5
338	I,008	2,923	2,032
343	I,009	2,958	2,06I

Продолжение табл.2

t, К	$C_p \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)	$\lambda_в \cdot 10^2$, Вт/(м·К)	$\mu \cdot 10^5$, Па с
348	I,009	2,998	2,085
353	I,009	3,039	2,I09
358	I,009	3,080	2,I28
363	I,009	3,I20	2,I50
368	I,009	3,I6I	2,I66
373	I,009	3,202	2,I89
378	I,009	3,237	2,2I4
383	I,009	3,265	2,242
388	I,009	3,30I	2,264
393	I,009	3,329	2,283

TT = μ = 1.71806E-5 - 3.96834E-8*TBE(I) +
+1.463423E-10*TBE(I)**2;

RB = $\lambda_в$ = 2.442E-2 - 6.2034E-5*TBE(I) +
+2.2819E-7*TBE(I)**2;

Таблица 3

Теплофизические свойства материалов

Наименование материала	ρ, кг/м^3	λ, Вт/(м·К)	$C \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)
Альфоль при толщине воздушных слоев I0 мм	-	0,03	
Алюминий	2700	2I0,0	0,900
Асбестовый картон	900	0,I6	0,8I6
Асбестовый шнур	800	0,I3	0,8I6
Гипс	I250	0,43	0,80-0,92
Графитовые изделия		I63	0,8
Дюралюминий (ДI6)	2750	I60-I80	0,920
Железо (листовое)	7880	74,0	0,450
Золото	I2500	293,I	I26,0
Карболит черный	II50,0	0,23I	-
Каучук твердый	II90	0,I59	-
Кембрик лакированный	-	0,I57	-
Керамика КПА-2	2800-2900	2,5-I,9	I,I00
Керамика УПА-2	3400-3500	22,0-I3,0	I,00
Ковар	-	-	0,46
Крошка пористой резины	I53	0,048	2,05
Латунь	8600	86,5	0,376
Магний	I700	I72,I	I,06

Продолжение табл.3

Наименование материала	ρ, кг/м^3	λ, Вт/(м·К)	С·I0^3, Дж/(кг·К)
Медь	8930	390,0–380,0	0,380
Никель	8900	67,5	0,425
Олово	7300	66,5	0,222
Платина	2I46	70,0	0,I32
Резина мягкая	–	0,I3–0,I6	I,380
Резина пористая	250	0,060	2,05
Резина твердая обыкновенная	I200	0,I57–0,I60	I,380
Серебро	I0500	420,0	0,234
Сталь	7900	45,0	0,470
Слюда	2500	0,24	–
Стекло обыкновенное	2500	0,740	0,670
Стеклотекстолит	I800	0,372	0,420
Текстолит	I300–I400	0,22–0,33	I,50–I,46
Фарфор	2400	I,04	I,09
Целлулоид светлый	I400	0,209	–
Эбонит	I200	0,I63	–

Соотношение между единицами давления

I мм рт.ст. = I33,3 Па

I бар = I0^5 Па

I кгс/см^2 = 98070 Па

ПРИЛОЖЕНИЕ 7

Справочное

МОДИФИЦИРОВАННЫЕ ФУНКЦИИ БЕССЕЛЯ ВТОРОГО РОДА НУЛЕВОГО И ПЕРВОГО ПОРЯДКА $K_0(mr)$ и $K_1(mr)$

mr	$K_0(mr)$	$K_1(mr)$	mr	$K_0(mr)$	$K_1(mr)$
0,0			I,5	0,2I38	0,2774
0,I	2,427I	9,8538	I,6	0,I880	0,2406
0,2	I,7527	4,7760	I,7	0,I655	0,2094
0,3	I,3725	3,0560	I,8	0,I459	0,I826
0,4	I,II45	2,I844	I,9	0,I288	0,I597
0,5	0,9244	I,6564	2,0	0,II39	0,I399
0,6	0,7775	I,3028	2,I	0,I009	0,I227
0,7	0,6605	I,0503	2,2	0,08927	0,I079
0,8	0,5553	0,86I8	2,3	0,079I4	0,09498
0,9	0,4867	0,7I65	2,4	0,07022	0,08372
I,0	0,42I0	0,60I9	2,5	0,06235	0,07389
I,I	0,3656	0,5098	2,6	0,05540	0,06528
I,2	0,3I85	0,4346	2,7	0,04926	0,05774
I,3	0,2782	0,3725	2,8	0,04382	0,05III
I,4	0,2437	0,3208	2,9	0,0390I	0,04529

Продолжение

mr	$K_o(mr)$	$K_1(mr)$	mr	$K_o(mr)$	$K_1(mr)$
3,0	0,03474	0,040I6	5,0	0,00369I	0,004045
3,I	0,03095	0,03563	5,I	0,003308	0,0036I9
3,2	0,02759	0,03I64	5,2	0,002966	0,003239
3,3	0,0246I	0,028I2	5,3	0,002659	0,002900
3,4	0,02I96	0,02500	5,4	0,002385	0,002597
3,5	0,0I960	0,02224	5,5	0,002I39	0,002326
3,6	0,0I750	0,0I979	5,6	0,00I9I8	0,002083
3,7	0,0I563	0,0I763	5,7	0,00I72I	0,00I866
3,8	0,0I397	0,0I57I	5,8	0,00I544	0,00I673
3,9	0,0I248	0,0I400	5,9	0,00I386	0,00I499
4,0	0,0III6	0,0I248	6,0	0,00I244	0,00I344
4,I	0,009980	0,0III4	6,I	0,00III7	0,00I205
4,2	0,008927	0,009938	6,2	0,00I003	0,00I08I
4,3	0,007988	0,008872	6,3	0,000900I	0,000969I
4,4	0,007I49	0,007923	6,4	0,0008083	0,0008693
4,5	0,006400	0,007078	6,5	0,0007259	0,0007793
4,6	0,005730	0,006325	6,6	0,0006520	0,0006998
4,7	0,005I32	0,005654	6,7	0,0005857	0,0006280
4,8	0,004597	0,005055	6,8	0,0005262	0,0005636
4,9	0,004II9	0,00452I	6,9	0,0004728	0,0005059

Продолжение

mr	$K_o(mr)$	$K_1(mr)$	mr	$K_o(mr)$	$K_1(mr)$
7,0	0,0004248	0,0004542	8,5	0,00008626	0,00009I20
7,I	0,00038I7	0,0004078	8,6	0,0000776I	0,00008200
7,2	0,000343I	0,0003662	8,7	0,00006983	0,00007374
7,3	0,0003084	0,0003288	8,8	0,00006283	0,0000663I
7,4	0,0002772	0,0002953	8,9	0,00005654	0,00005964
7,5	0,0002492	0,0002653	9,0	0,00005088	0,00005364
7,6	0,0002240	0,0002383	9,I	0,00004579	0,00004825
7,7	0,00020I4	0,0002I4I	9,2	0,00004I2I	0,00004340
7,8	0,000I8II	0,000I924	9,3	0,000037I0	0,00003904
7,9	0,000I629	0,000I729	9,4	0,00003339	0,000035I2
8,0	0,000I465	0,000I554	9,5	0,00003006	0,00003I60
8,I	0,000I3I7	0,000I396	9,6	0,00002706	0,00002843
8,2	0,000II85	0,000I255	9,7	0,00002436	0,00002559
8,3	0,000I066	0,000II28	9,8	0,00002I93	0,00002302
8,4	0,00009588	0,000I0I4	9,9	0,0000I975	0,00002072
			I0,0	0,0000I778	0,0000I865

СОДЕРЖАНИЕ